

硬岩隧道掘进机性能预测模型研究进展

刘泉声^{1,2}, 刘建平¹, 潘玉丛¹, 孔晓璇², 崔先泽¹, 黄诗冰¹, 魏 莱¹

- (1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071 ;
2. 武汉大学 土木建筑工程学院岩土与结构工程安全湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430072)

摘要: 由于硬岩隧道掘进机(TBM)对地质条件极其敏感,且前期投资较大,准确预测特定地质条件下的 TBM 性能对于隧道施工方法选择、施工进度安排和成本估计至关重要,同时也是隧道行业内的热门话题。首先回顾国内外 TBM 性能预测模型的研究进展,对目前常用的 TBM 性能预测模型进行较为详细地介绍。基于对理论模型和复杂经验模型(总计 17 个)中使用的岩体参数和机器参数的频率统计,发现影响 TBM 性能的岩体参数主要包括不连续面间距、岩石单轴抗压强度、不连续面和隧道轴向之间的夹角、隧道直径和岩石脆性等;影响 TBM 性能的机器参数主要包括单刀推力、刀盘转速、刀具直径、刀间距、刀尖宽度和滚刀岩石接触角等。基于统计结果论述各参数对 TBM 性能的影响,最后根据国外 TBM 性能预测模型的发展历程对国内开发 TBM 性能预测模型提出一些建议。

关键词: 隧道工程;隧道掘进机(TBM);性能预测模型;岩体参数;机器参数

中图分类号: U 45 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6915(2016)增 1-2766-21

Research advances of tunnel boring machine performance prediction models for hard rock

LIU Quansheng^{1,2}, LIU Jianping¹, PAN Yucong¹, KONG Xiaoxuan²,
CUI Xianze¹, HUANG Shibing¹, WEI Lai¹

- (1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. Key Laboratory of Safety for Geotechnical and Structural Engineering of Hubei Province, School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China)

Abstract: With significant sensibility to the varying geological conditions and enormous financial investment in the earlier phase of tunneling project, predicting of TBM performance accurately with special geological conditions has a crucial importance for selecting tunnel construction method, arranging construction schedule and assessing excavation cost. In this study, the hot topic on research advances of TBM performance prediction models both at home and abroad are systematically reviewed firstly and the widely adopted ones are introduced detailedly. The results based on the statistical counting of the occurrence frequency of rock mass properties and machine parameters used in 17 models including theoretical models and complex empirical models show that the dominating rock mass properties affecting TBM performance include discontinuity spacing, intact rock uniaxial compressive strength, α angle between the discontinuity and tunnel axial, tunnel diameter and rock brittleness, etc. And the main machine parameters contributed in the performance predictions are mostly thrust per cutter,

收稿日期: 2014-11-27; **修回日期:** 2015-04-23

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2014CB046904, 2015CB058102); 国家自然科学基金重点项目(41130742)

Supported by the National Key Basic Research Program of China(973 Program)(Grant Nos. 2014CB046904, 2015CB058102) and National Natural Science Foundation of China(Grant No. 41130742)

作者简介: 刘泉声(1962-), 男, 博士, 1983年毕业于山东矿业学院矿井建设专业, 现任研究员、博士生导师, 主要从事岩土与地下工程方面的教学与研究工作。E-mail: liuqs@whrsm.ac.cn

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2014.1601

rotating speed of cutterhead, cutter diameter, cutter spacing, cutter tip width and angle of contact area between rock and disc cutter, etc. The influence of each controlling parameters on TBM performance prediction is discussed based on the statistical results. Finally, according to the developing history of the foreign prediction models, some useful suggestions are put forward for the development of TBM performance prediction models in China.

Key words: tunnel engineering; tunnel boring machine(TBM); performance prediction model; rock mass parameters; machine parameters

1 引言

国民经济快速可持续发展迫切需要大力建设水利、交通、矿山等重大生命线工程。高速公路和铁路客运专线正在向西部延伸,矿产资源开采正在向超千米深部大规模发展,未来 10 a 西部地区将要建设一大批跨流域调水工程,而深埋长大隧道是这些生命线工程的关键控制性工程。开挖这些深埋长大隧道工程,工期对经济效益和生态环境等方面有着重大影响,而且隧道掘进工作面又常常受到很大限制,面对速度、环保、效益等问题,使用隧道掘进机无疑是最好的选择。隧道掘进机(TBM)具有开挖快、优质、安全、经济、有利于环境保护和降低劳动强度等优点^[1]。与传统隧道施工方法相比,TBM 工法施工速度快,其掘进效率是传统钻爆法的 3~10 倍^[2]。随着掘进机制造技术的快速发展,特别是引入计算机技术和信息技术后,隧道掘进机的掘进效率普遍提高,并创造了新的掘进记录。国外采用 TBM 掘进一条直径 3.4 m、长 18 km 的隧道时,创造了日最佳掘进 172.4 m,月最佳掘进 2 187 m 的记录^[3]。国内采用 TBM 掘进山西万家寨引黄工程隧道时,创造了日最佳掘进 113.21m,月最佳掘进 1 821.5 m 的记录^[4]。根据国外实践证明,当隧道长度与直径之比大于 600 时,采用 TBM 进行隧道施工是经济的。在一些发达国家中,有关部门还明确规定 3 km 以上的隧道必须采用 TBM 施工^[5]。由于硬岩隧道掘进机对地质条件极其敏感,且前期投资较大,准确预测特定地质条件下的 TBM 性能对于隧道施工方法选择、施工进度安排和成本估计至关重要,同时也是隧道行业内的热门话题。在过去的 40 a 间,国内外研究人员开发了大量的 TBM 性能预测模型,TBM 性能预测模型经历了从简单模型到复杂模型的发展历程。由于岩机相互作用的复杂性,要想从理论上全面揭示 TBM 性能和岩体性质之间的相关性是非常困难的。正如 R. J. Robbins^[6]所述:“没有哪项工

作比评估岩体特征和运用评估的岩体特征来预测 TBM 性能更难”。P. P. Nelson^[7]认为:“目前岩土工程行业还没有一种推荐的方法来定量估计岩体变化对 TBM 施工性能的影响”。

TBM 性能预测即要预测 TBM 的净掘进速度 PR (penetration rate)、施工速度 AR (advance rate)、利用率 U (utilization)和刀具磨损 H (cutter wear)。净掘进速度 PR 为连续开挖阶段开挖距离与开挖时间的比值。施工速度 AR 为开挖和支护距离与开挖总时间的比值,开挖总时间包括掘进、换步、查刀、支护安装和停机检修等时间。利用率 U 也称为挖掘劳动率,为掘进时间占开挖总时间的百分比,即施工速度与净掘进速度的比值。刀具磨损 H 一般用单把刀具开挖的岩碴体积或开挖距离来表示。目前大多数 TBM 性能预测模型只关注净掘进速度的预测,仅少数模型可以同时预测以上 4 个参数。

本文首先回顾国内外 TBM 性能预测模型的研究进展,对目前常用的 TBM 性能预测模型进行详细介绍,对国外理论模型和复杂经验模型(总计 17 个)中各岩体参数和机器参数的使用频率进行统计,基于统计结果论述各参数对 TBM 性能的影响。最后根据国外 TBM 性能预测模型的发展历程对国内开发 TBM 性能预测模型提出一些建议。

2 TBM 性能预测模型国内研究进展

目前国内在 TBM 性能预测模型方面研究较少,开发的 TBM 性能预测模型更是屈指可数。国内主要通过以下 3 个方面研究 TBM 施工性能:一是基于 TBM 施工现场性能数据和地质资料,研究岩体参数(岩体完整性、岩石单轴抗压强度和岩石磨蚀性等)和机器参数(TBM 总推力和扭矩等)对 TBM 施工性能的影响;二是基于数值模拟和室内试验,研究岩体参数(节理间距、节理走向和围压等)和刀具参数(刀刃宽度和刃角等)对滚刀破岩的影响;三是根据国外的相关研究成果,探讨 TBM 性能预测研究

思路。

2.1 TBM 施工现场研究

谷志孟和吕福庆^[8]依托云南下关西洱河水工隧洞施工现场，研究了岩石的物理力学特性及其赋存状况对 TBM 破岩可钻性的影响，提出以地质条件为基础，按照岩石坚固性、完整性和磨蚀性综合划分岩石可钻性分级的初步方案。王石春^[9]论述了 TBM 和地质因素之间的关系以及 TBM 施工隧道的地质工作要点，提出根据岩石单轴抗压强度、岩体完整性系数、岩石耐磨性和岩石硬度来确定 TBM 的工作条件等级。何发亮和谷明成^[10]结合秦岭隧道 TBM 施工研究，提出在围岩稳定性等级划分的基础上，根据岩石单轴抗压强度、岩体完整程度(裂隙化程度)、岩石耐磨性和岩石硬度，进行 TBM 施工条件下的隧道围岩分级。刘明月等^[11]结合秦岭隧道施工的相关数据，研究了净掘进速度、利用率、刀具磨损、比能等表征 TBM 掘进效率的指标与岩石单轴抗压强度、围岩等级、围岩类型等地质因素之间的关系。王梦恕等^[2]分析了秦岭隧道花岗岩和片麻岩地层条件下地质因素对 TBM 掘进效率的影响。李春明和彭耀荣^[12]在考虑影响 TBM 掘进效率的主要工程地质因素后，提出在 BQ 围岩分级的基础上，根据岩石单轴抗压强度、岩石耐磨性和岩体完整性，将 TBM 施工条件下的隧洞围岩分为 A(好)、B(一般)、C(差)3 个级别。王学潮^[13]针对南水北调西线工程的实际地质条件，重点研究了影响 TBM 施工的主要工程地质和岩石力学因素，提出 TBM 施工条件下围岩分类的主要依据是岩石单轴抗压强度、岩组特征、结构面特征等，以上述影响因素为参数，提出了 TBM 施工围岩分类标准。宋克志等^[14-15]基于重庆越江隧道现场掘进试验和岩石点荷载强度试验，研究了泥岩、砂岩交互地层条件下泥水盾构的掘进效能及其影响因素。运用最小二乘法拟合原理建立了典型泥岩和砂岩地层下的盾构净掘进速度预测模型。典型泥岩地层盾构净掘进速度预测方程为

$$PR_1 = 1.7314 \times 10^{-7} \frac{TF^{2.1468}}{I_s^{0.2214}} \quad (1)$$

式中： PR_1 为典型泥岩地层的盾构净掘进速度， TF 为 TBM 总推力， I_s 为岩石点荷载强度。

典型泥砂岩地层盾构净掘进速度预测方程为

$$PR_2 = 5.705 \times 10^{-9} \frac{TF^{2.5474}}{I_s^{0.2270}} \quad (2)$$

式中： PR_2 为典型砂岩地层的盾构净掘进速度。

上述模型类似于 Graham 模型，由于仅考虑

TBM 总推力和岩石点荷载强度对 TBM 净掘进速度的影响，其预测精度不高，但这是第一个用岩石点荷载强度来表征岩石强度参数的模型。岩石点荷载试验因其简易性和方便性，在掘进现场非常实用，这或许是 TBM 掘进现场可用于快速表征岩石强度性质的最佳选择。

温森等^[16]基于美国纽约 Queens No.3 输水隧洞掘进数据和岩体参数，提出了 Monte Carlo-BP 神经网络 TBM 净掘进速度预测模型。实例计算结果表明，Monte Carlo-BP 神经网络模型预测结果和实测值总体趋势和均值比较一致，证明了神经网络模型在预测 TBM 性能中的巨大潜力。龚秋明等^[17-18]依托锦屏 II 级水电站 TBM 施工引水隧洞工程，研究了岩体层厚对 TBM 开挖的影响。根据锦屏 II 级水电站 3 台 TBM 在不同地应力条件下的 TBM 掘进试验、岩石碴片筛分试验及大碴片统计分析，研究了地应力对 TBM 施工性能的影响。吴世勇等^[19]针对锦屏 II 级水电站 TBM 引水洞及排水洞深部大理岩发生的板裂化破坏现象，研究了掌子面和洞壁板裂化破坏对 TBM 施工性能的影响。

总的来说，基于 TBM 施工现场性能数据和地质资料，研究各种岩体参数和机器参数对 TBM 施工性能的影响，能够较准确地反映岩机相互作用结果，但由于岩机相互作用过程极其复杂，想通过少量的施工实例来揭示岩机相互作用机制，从而准确预测 TBM 性能是不太可能的。出于普适性方面的考量，只有收集大量的 TBM 施工现场案例数据才能准确地预测 TBM 性能。

2.2 数值模拟和室内试验研究

苏利军等^[20]采用颗粒流方法模拟滚刀的破岩过程，研究了不同刃角和刃宽对滚刀破岩的影响。孙金山等^[21]采用颗粒流方法建立了岩石试件与滚刀作用的数值模型，分析了单刃滚刀和双刃滚刀破岩过程的影响因素。莫振泽等^[22]运用 UDEC 方法建立了滚刀贯切岩石的二维数值模型，研究了刀圈断面形态、岩石强度和节理角度对滚刀破岩的影响。张魁等^[23]利用 UDEC 仿真软件建立了双把 TBM 刀具侵入岩石的仿真模型，研究了不同围压条件下 TBM 刀具的破岩机制。谭青等^[24-25]利用离散元方法建立岩石与盘形滚刀的二维数值模型，研究了盘形滚刀的结构参数(刀刃宽、刀刃角)对滚刀破岩特性的影响；基于颗粒离散元法研究了节理特征对 TBM 盘形滚刀破岩机制的影响。马洪素和纪洪广^[26]通过室内压痕试验研究了不同节理面与掘进方向夹

角对 TBM 滚刀破岩效果的影响。邹飞等^[27]在改进的试验装置上进行压头作用下相似材料的变形、破坏试验,研究了岩体节理参数(节理间距和节理倾角)对 TBM 盘形滚刀破岩效果的影响。

总的来说,基于数值模拟和室内试验,研究岩体参数和刀具参数对滚刀破岩的影响,有助于进一步揭示滚刀破岩机制,但数值模拟、室内试验与 TBM 现场施工仍存在一定的差别,且 TBM 工法是集破岩、出碴、导向和支护于一体的系统化施工方法,数值模型和室内试验基本没有考虑出碴、导向和支护对 TBM 性能的影响,也即是说数值模型和室内试验仅能预测净掘进速度,不能预测施工速度和刀具磨损,而施工速度和刀具磨损才是预测 TBM 施工时间和施工成本的关键。

2.3 TBM 性能预测思路探讨

祁生文等^[28]从地质体、施工机械以及施工组织和管理三个方面较为详细地论述了 TBM 施工速度的影响因素,分析了目前围岩分类考虑因素和 TBM 施工速度影响因素之间的差异,认为目前基于钻爆法施工的围岩分类直接用于 TBM 性能预测是不可行的。由于影响施工速度的因素众多,各因素之间相互影响,关系复杂,引入处理复杂关系的现代数学工具(如模糊数学、层次分析法、神经网络和遗传算法等)势在必行。王旭等^[29-31]发现 3 个因素制约 TBM 性能预测的准确性:岩体条件的不确定性、岩机相互作用的复杂性和施工过程的多变性;并指出岩体质量分级系统不能用于预测 TBM 净掘进速度,预测 TBM 净掘进速度的岩体分级系统应与评价岩体稳定的岩体分级系统分开进行,用岩体可掘进性分级系统预测净掘进速度,用岩体质量分级系统预测 TBM 利用率,从而计算出 TBM 的施工速度;同时推荐用室内全尺寸切割试验来进行 TBM 设计,用 Cerchar 磨蚀性试验来测定岩石磨蚀性。

总的来说,根据国外的相关研究成果,国内一些学者对 TBM 性能预测研究思路进行了初步探讨,提出了众多有益的思考,但大多提出的 TBM 性能预测研究思路都较为粗犷,没有对其进行细化,也未在实际中切实执行过,故相关思路的可行性和准确性无从判别。

3 TBM 性能预测模型国外研究进展

目前国外在 TBM 性能预测模型方面研究较多,自 20 世纪 70 年代以来,国外已经开发了 30 多个

TBM 性能预测模型。所有的 TBM 性能预测模型可以分为两大类,即理论模型和经验模型。理论模型基于刀具破岩机制,通过压痕试验或室内全尺寸切割试验,分析作用在单把刀具上的切割力,从而得到刀具力平衡方程,其中最著名的是科罗拉多矿业学院开发的 CSM 模型^[32]。室内全尺寸线性切割试验是目前实验室内可实现的最接近 TBM 现场破岩的试验(见图 1^[33])。

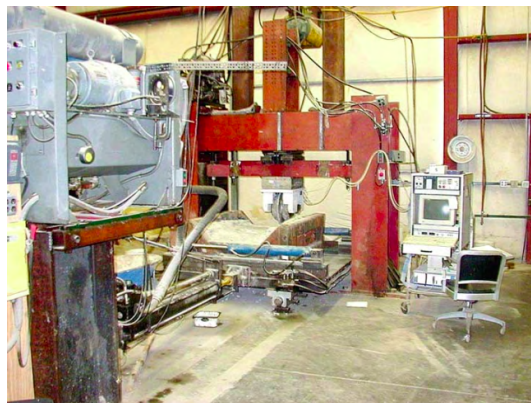


图 1 室内全尺寸线性切割试验设备^[33]

Fig.1 Laboratory full scale linear cutting testing equipment^[33]

在岩土工程实践中,基于统计数据的经验公式已被广泛用于预测目标变量。经验公式在项目可行性研究阶段、设计阶段和施工阶段都能发挥很大作用,因为相对于理论分析,经验公式更加实用,且更易被施工人员掌握。出于简单方便考虑,早期开发的经验模型一般只考虑一个或两个岩石力学参数,如岩石单轴抗压强度、抗拉强度或硬度等。由于简单模型预测精度不高,目前已基本不再使用。后期开发的经验模型通过收集大量的岩体参数和机器参数,构建庞大的 TBM 性能数据库,运用多元回归分析、模糊数学和神经网络等方法,开发了众多复杂经验模型,其中最著名的是挪威科技大学开发的 NTNU 模型^[3]。另外,一些研究人员基于岩体质量分级思路,尝试开发新的岩体可掘性分级系统,将 TBM 性能与岩体可掘性分级系统联系起来,其中比较有名的有 Q_{TBM} 模型^[34]和 RME 模型^[35-38]。

现将所有模型分为理论模型和经验模型两大类,经验模型又分为简单模型和复杂模型,以时间顺序对国外开发的各种 TBM 性能预测模型进行简要回顾,对目前常用的 TBM 性能预测模型进行详细介绍。

3.1 理论模型

(1) Sanio 模型

H. P. Sanio^[39]基于简单的理论分析和试验,假定滚刀破岩机制主要为张拉破坏,而非剪切破坏,开发了层状和片状岩石中滚刀破岩性能的预测公式。研究发现沿垂直和平行弱面方向掘进时净掘进速度的比值等于沿垂直和平行弱面方向加载时点荷载强度的比值,如下式所示:

$$\frac{p_0}{p_{90}} = \frac{I_{s50}}{I_{s50}} \quad (3)$$

式中: p_0 为沿垂直弱面方向掘进时的贯入度, p_{90} 为沿平行弱面方向掘进时的贯入度, I_{s50} 为沿垂直弱面加载时的点荷载强度, I_{s50} 为沿平行弱面加载时的点荷载强度。

Sanio 模型考虑了岩体各向异性和不连续性对滚刀破岩性能的影响,但仅用不同方向的点荷载强度来预测每转贯入度,预测精度不高。

(2) 量纲模型

R. J. Boyd^[40]运用量纲分析法来预测 TBM 净掘进速度。假定每类岩石存在特定比能(比能定义为开挖单位体积岩石所需的能量),如果已知隧道横截面积和刀盘安装功率,则可以预测 TBM 净掘进速度,其计算公式为

$$PR = \frac{HP\eta}{SEA} \quad (4)$$

式中: HP 为刀盘安装功率, η 为机器效率因子, SE 为比能, A 为隧道横截面积。

Boyd 模型运用量纲分析来预测 TBM 净掘进速度,克服了回归分析和模糊神经网络建模时量纲不一致的问题,但目前还没有详细的每类岩石对应的比能值,且机器效率因子的取值也需十分谨慎。

(3) CSM 模型

美国科罗拉多矿业学院对大量完整岩样进行室内全尺寸线性切割试验,基于试验数据开发了著名的 CSM 模型。该模型的第一个版本由 L. Ozdemir^[41]于 1977 年完成,后于 1993 年^[33]和 1997 年^[32]两次更新,开发用时长达 20 a。该模型考虑了大量影响滚刀破岩的因素,如岩石单轴抗压强度、抗拉强度和刀具几何特征等。基于力平衡法,CSM 模型首先计算作用在单把滚刀上的刀具荷载,然后确定整个刀盘所需的总推力、扭矩和功率,将估计值与 TBM 有效推力、扭矩和安装功率等进行比较,从而得到 TBM 能实现的最大贯入度,其推导过程和计算简图(见图 2^[42])。

假定滚刀和岩石表面接触区域内压力均匀分布,则积分可得滚刀合力,其估算公式为

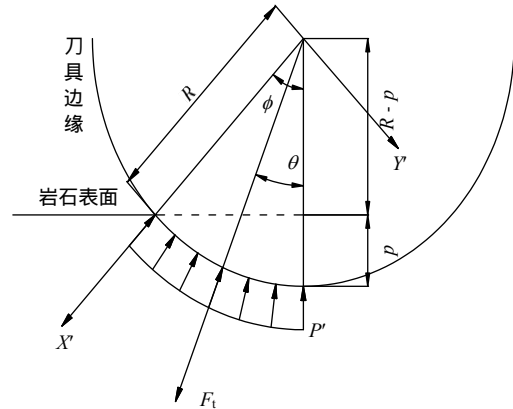


图 2 滚刀下压力分布图^[42]

Fig.2 Shape of pressure distribution under disc cutter^[42]

$$F_t = \int_0^\phi TRP' d\theta = \int_0^\phi TRP^0 \left(\frac{\theta}{\phi}\right)^\psi d\theta = \frac{TRP^0 \phi}{1+\psi} \quad (5)$$

其中,

$$\phi = \cos^{-1}\left(\frac{R-p}{R}\right) \quad (6)$$

式中: F_t 为滚刀合力, T 为刀尖宽度, R 为滚刀半径, P^0 为滚刀下压碎区基准压力, ϕ 为滚刀与岩石表面的接触角, ψ 为压力分布函数常量, p 为滚刀贯入度。

滚刀法向力 F_n 和滚动力 F_r 的计算公式分别为

$$F_n = \frac{TRP^0}{\phi} (1 - \cos\phi) \quad (7)$$

$$F_r = \frac{TRP^0}{\phi} (1 - \sin\phi) \quad (8)$$

出于量纲考虑,对 CSM 数据库中有效数据进行对数回归分析得到压碎区基准压力的计算公式为

$$P^0 = C \sqrt[3]{\frac{UCS^2 BTSS}{\phi \sqrt{RT}}} \quad (9)$$

式中: C 为常量, S 为滚刀间距, UCS 为岩石单轴抗压强度。

计算 TBM 所需总推力:

$$TF = \sum_1^N F_n \quad NF_n \quad (10)$$

式中: N 为刀盘上安装的滚刀数量(忽略中心刀、面刀和边刀的区别)。

计算 TBM 所需扭矩:

$$TR = \sum_1^N F_{tr} r_i = 0.3DNF_r \quad (11)$$

式中: TR 为 TBM 所需扭矩, D 为 TBM 直径。

计算刀盘转速：

$$RPM = \frac{V}{\pi D} \quad (12)$$

式中： RPM 为刀盘转速， V 为刀具最大线速度(如 17 寸滚刀的最大线速度为 175 m/min)。

计算 TBM 刀盘所需功率：

$$PW = \frac{2\pi TR \cdot RPM}{60} = \frac{TR \cdot RPM}{9.55} \quad (13)$$

式中： PW 为 TBM 刀盘所需功率。

对于给定类型的岩石和机器，上述所有参数中只有贯入度未知，故可采用迭代法，逐渐增大贯入度，直到某一参数达到 TBM 额定参数(如总推力、扭矩或功率)，即可得到特定条件下 TBM 能实现的最大贯入度。

准确地说 CSM 模型应是一个半理论模型，因为压碎区基准压力计算公式是通过多元回归分析得到。CSM 模型基于室内全尺寸线性切割试验数据而开发，由于室内试验所用岩样与 TBM 现场掘进岩体存在一定的区别，特别是忽略了岩体不连续性(如节理等)对 TBM 施工性能的影响，故该模型的 TBM 性能预测结果偏于保守。一些研究人员发现了这一结果，并进行了相应改进。

(4) 改进的 CSM 模型

S. Yagiz^[43]基于纽约皇后隧道的 TBM 施工性能数据和地质资料，在原有 CSM 模型的基础上，加入表征岩石破碎和脆性的指标，开发了一个新的 TBM 净掘进速度预测模型，其净掘进速度预测公式为

$$PR = 0.859 - 0.018 7J_s + 1.44 \lg \alpha + 0.015 7PSI + 0.096 9PR_{CSM} \quad (14)$$

$$RFI = -0.018 7J_s + 1.44 \lg \alpha \quad (15)$$

$$BI = 0.015 7PSI \quad (16)$$

$$PR = 0.859 + RFI + BI + 0.096 9PR_{CSM} \quad (17)$$

式中： J_s 为弱面(包括节理、层理等)间距， α 为弱面和隧道轴向间的夹角， PSI 为峰值斜率指数， PR_{CSM} 为 CSM 模型评估的基本净掘进速度， RFI 为岩石破碎指数， BI 为岩石脆性指数。

A. Ramezanzadeh^[44]接着上述工作，基于 11 条总长超过 60 km 的 TBM 隧道施工性能数据和地质资料，在原有 CSM 模型的基础上，考虑岩体参数对 TBM 施工性能的影响，开发了一个新的每转进尺预

测模型，其预测公式为

$$PRev = PRev_{CSM}^{0.37} \exp(1.8 - 0.003 1J_s - 0.006 5\alpha) \quad (18)$$

式中： $PRev$ 为刀盘每转进尺， $PRev_{CSM}$ 为 CSM 模型评估的 TBM 基本每转进尺。

改进的 CSM 模型是在原有 CSM 模型的基础上，基于新收集的数据运用统计分析而得，属于半理论半经验模型，其在破碎岩体中的预测精度大大提高。

3.2 经验模型

(1) 简单模型

P. J. Tarkoy^[45]运用施密特锤反弹硬度和泰伯尔磨蚀硬度估计岩石总硬度，研究了总硬度为 2 ~ 242 的石灰岩、页岩、砂岩等的净掘进速度与总硬度之间的关系，其计算公式为

$$PR = 3.716 - 0.019 H_T \quad (19)$$

$$H_T = H_R \sqrt{H_A} \quad (20)$$

式中： H_T 为岩石总硬度， H_R 为施密特锤反弹硬度， H_A 为泰伯尔磨蚀硬度。

P. C. Graham^[46]将刀盘每转进尺看作单刀推力和岩石单轴抗压强度的函数，其计算公式为

$$PRev = \frac{3 940 F_n}{UCS} \quad (21)$$

式中： F_n 为单刀推力。

I. W. Farmer 和 N. H. Glossop^[47]运用平均单刀推力和岩石抗拉强度来计算刀盘每转进尺。该模型基于 8 条 TBM 隧道施工性能数据和地质资料，其计算公式为

$$PRev = \frac{624 F_n}{BTS} \quad (22)$$

式中： BTS 为岩石抗拉强度。

F. Cassinelli 等^[48]研究了岩石结构评分(RSR)系统与 TBM 性能之间的关系。TBM 净掘进速度和 RSR 之间的关系为

$$PR = -0.005 9RSR + 1.59 \quad (23)$$

式中： RSR 为岩石结构评分。

R. A. Snowdon 等^[49]用直径 200 mm 的 V 形滚刀进行了一系列的滚刀线性切割试验，发现每类岩石的最小比能对应一个恒定的刀间距/贯入度(S/p)比值。运用回归分析得到滚刀法向力、滚动力和刀盘每转进尺之间的关系为

$$\frac{F_n}{F_r} = 21.71PR_{ev}^{-0.656} \quad (24)$$

P. Nelson 等^[50]基于 4 条沉积岩 TBM 隧道施工性能数据和地质资料, 开发了一个 TBM 每转进尺预测模型, 其预测公式为

$$PR_{ev} = 10.45 - 1.19H_A \quad (25)$$

P. Nelson 等^[50]还发现净掘进速度除与岩石类型有关外, 还于单刀推力有关。因此, 提出了岩石总硬度和现场贯入度指数之间的相关性公式:

$$FPI = 5.95 + 0.18H_T \quad (26)$$

$$FPI = \frac{F_n}{PR_{ev}} \quad (27)$$

式中: FPI 为现场贯入度指数。

W. E. Bamford^[51]基于 2 条 TBM 隧道(澳大利亚)施工性能数据和地质资料, 发现运用施密特锤反弹硬度、TBM 总推力、NCB 压痕硬度和抗剪角可以很好地预测净掘进速度, 其预测公式为

$$PR = 0.535H_R - 8.49 - 0.00344TF - 0.000823H_N + 0.00137\phi \quad (28)$$

式中: TF 为 TBM 总推力, H_N 为 NCB 压痕硬度。

E. Büchi^[52]基于总长约 38 km 的 TBM 隧道施工性能数据和地质资料, 提出了一个净掘进速度预测模型。该模型首先用 CSM 模型预测公式来评估各向同性无裂缝岩石中的净掘进速度, 将其作为最小或基本净掘进速度, 输入参数包括刀具直径、刀具荷载、刀间距、岩石单轴抗压强度和岩石抗拉强度等; 然后修正岩石各向异性以获得各向异性无裂缝岩体中的净掘进速度; 最后修正岩体破碎以获得破碎岩体的净掘进速度。

H. M. Hughes^[53]预测煤系地层中正面滚刀的破岩性能, 提出了一个类似于 P. C. Graham 模型的新模型。该模型考虑了大量影响 TBM 性能的参数, 如单刀推力、岩石单轴抗压强度、刀盘转速、每个切口(槽)的平均刀具数量和滚刀平均半径。开发的预测公式为

$$PR = \frac{6F_n^{1.2}RPMN_k}{UCS^{1.2}R^{0.6}} \quad (29)$$

式中: RPM 为刀盘转速, N_k 为每切口(槽)平均滚刀数量。

N. Innaurato 等^[54]基于 5 条总长 19 km 的 TBM 隧道施工性能数据和地质资料, 运用获得的 112 组

有效数据, 对 F. Cassinelli 等^[48]模型进行了升级。升级模型的主要变化是在 TBM 净掘进速度预测模型中考虑了岩石单轴抗压强度的影响, 其预测公式为

$$PR = 40.41UCS^{-0.437} - 0.047RSR + 3.15 \quad (30)$$

N. O. Sundin 和 S. Wänstedt^[55]用可掘性指数 I_B 来表征岩体的可掘性。根据应用目的的不同, 存在 2 种可掘性指数计算方法。在可掘性模型中, 可掘性指数为净掘进速度与刀盘转速和单刀推力的比值, 运用可掘性模型可以察觉掘进过程中岩体的重大变化, 如断层或不同类型岩石。同时, 可掘性模型有助于隧道地质素描和支护设计。在预测模型中, 用压痕试验数据、节理和弱面修正因子来计算可掘性指数。

J. E. O'Rourke 等^[56]基于变质岩 TBM 隧道施工性能数据和地质资料, 发现现场贯入度指数和岩石总硬度之间存在显著的相关性:

$$FPI = 36 + 0.23H_T \quad (31)$$

由于岩机相互作用的复杂性和影响 TBM 性能因素的多样性, 简单模型因其考虑因素较为单一, 模型预测精度较低, 现已基本不再使用。

(2) 复杂模型

P. P. Nelson 模型(概率模型)

P. P. Nelson 等^[57]基于包含大约 640 条 TBM 隧道的数据库, 开发了著名的概率模型。概率模型数据库被分为 4 个不同详细程度的数据组。其中, 第 1 层次数据组由整个工程的平均数据构成; 第 2, 3 层次数据组由相对应区段的平均数据组成; 第 4 层次数据组包括源于隧道地质素描和日常施工报告中的详细的掘进机系统特征以及描述掘进机各个子系统工作时的概率密度函数, 这些函数以 2 次机器破坏的时间以及维修机器的时间为表征^[58]。

概率模型预测结果的准确性取决于预测隧道岩体参数和机器参数与原始数据库中不同层次岩体参数和机器参数的相似程度, 相似程度越高, 预测精度越高。

NTNU 模型

挪威科技大学基于大量的 TBM 隧道施工性能数据和地质资料, 对岩体参数和机器参数进行回归分析后得到了一系列的经验图表和预测方程。NTNU 模型是目前隧道行业内最广泛使用的模型, 尤其在欧洲。在目前的技术条件下, 其预测能力已经被大量工程实践所证明。由于科学技术水平的不断提高, NTNU 模型先后经历了 6 次更新, 其最新

版本模型由 A. Bruland^[3]在第五版本模型的基础上，基于收集的最新数据开发而来。NTNU 模型中的净掘进速度预测模型基于 TBM 掘进试验曲线，掘进曲线的基本特征是临界推力 $F_{n(1)}$ 和贯入系数 b ，如图 3 所示，其净掘进速度预测方程为

$$PRev = \left(\frac{F_{n(ekv)}}{F_{n(1)}} \right)^b \quad (32)$$

式中： $F_{n(ekv)}$ 为等效单刀推力， $F_{n(1)}$ 为每转进尺达到 1 mm/rev 对应的单刀推力， b 为贯入系数。

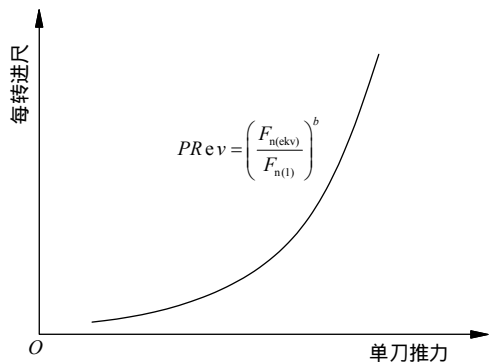


图 3 掘进试验曲线的一般过程^[3]

Fig.3 General progress of a penetration test curve^[3]

净掘进速度预测模型建模的第一步是对数据库中数据进行回归分析以建立 $F_{n(1)}$ 和 b 与各种地质参数和机器参数之间的关系；第二步是用获得的有效数据评估建立的回归模型，调整回归参数使拟合模型达到最佳。机器参数的影响用等效单刀推力 $F_{n(ekv)}$ 来表征，岩体参数的影响用等效裂隙因子 k_{ekv} 来表征。刀具磨损用刀具更换记录数据和相应室内岩样试验数据来评估。利用率用隧道开挖时各子操作用时来评估。施工速度用利用率和净掘进速度来评估。开挖成本用所有包含在施工成本中的各项成本来评估。

NTNU 模型开发使用的数据库至今仍处于保密状态，只有在挪威科技大学才能使用这些数据。同时需采用一系列特殊试验来获取模型中的输入参数，其基本试验和测量方法^[59]如下：

脆性试验“ S_{20} ”：采用质量 14 kg 的重锤从 25 cm 高处冲击粒径为 11.2 ~ 16.0 mm 的岩样(500 g)20 次，得到通过 11.2 mm 孔筛的岩石质量百分比，取 3 ~ 5 次试验的平均值。

岩石表面硬度 Sievers'J 指数：采用 8.5 mm 直径的微型钻头在岩样表面旋转 200 圈，得到钻孔孔深，精确到 0.1 mm，取 4 ~ 8 次试验的平均值。

磨损试验 AV 值：采用碳化钨合金试件在分布有岩粉的磨盘上旋转 100 圈(5 min)，得到碳化钨合金试件的损失重量，取 2 ~ 4 次试验的平均值。

NTNU 模型先后经历了 6 次改进，每次改进后的预测结果都不相同，图 4 和 5 分别给出了 6 版本模型对同一地质参数(见表 1)预测的净掘进速度和开挖成本结果的对比情况。

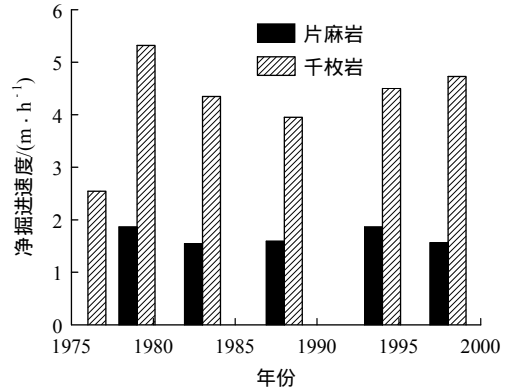


图 4 安装 394 mm 滚刀的 3.5 m 直径 TBM 预测净掘进速度^[3]

Fig.4 Predicted net penetration rate for a 3.5 m diameter TBM with 394 mm cutters^[3]

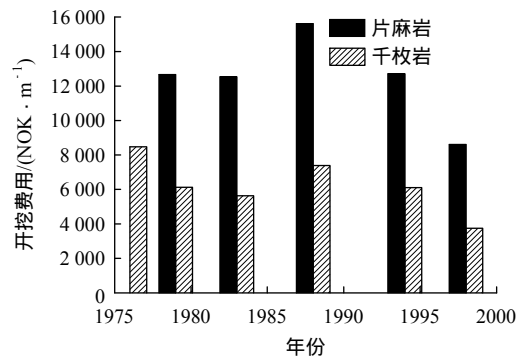


图 5 安装 394 mm 滚刀的 3.5 m 直径 TBM 预测开挖费用(挪威 1999 年一月的价格水平)^[3]

Fig.5 Predicted excavation costs for a 3.5 m diameter TBM with 394 mm cutters(Price level of January 1999 in Norway)^[3]

表 1 模型比较使用的地质参数^[3]

Table 1 Geological parameters for comparison of models^[3]

岩性	DRI	CLI	石英含量/%	弱面平均间距/cm	α (°)
片麻岩	40	8	20	140	20
千枚岩	60	25	25	10	20

注：DRI 为钻速指数，CLI 为刀具寿命指数。

从图 4 可以看出，除第一版本模型外，其余几个版本模型预测的净掘进速度变化不大，其原因是第一版本模型没有考虑单刀推力的影响，而是假定

机器参数处于相应岩体条件下的最优状况，显然这与实际情况是不相符的。从第二版本模型开始，在净掘进速度预测时考虑单刀推力的影响。

从图 5 可以看出，第四版本模型预测的开挖费用非常高，目前还不能很好地解释这一现象，可能是由于所有的输入参数都偏于保守。随着科学技术水平的提高，尤其是刀具材料和制造工艺的改进以及现代信息技术的引入，TBM 隧道的开挖费用呈逐年下降趋势，这也促使了 TBM 工法成为深埋长大隧道的标准施工方法。

NTNU 模型采用一些特殊实验来获取模型相关输入参数，这些试验仅在欧洲较为普遍，使得 NTNU 模型的适用性受到很大限制，此外，NTNU 模型严重依赖于以往 TBM 隧道施工数据，其预测能力很大程度上受限于新旧岩机特征的相似性。正如 A. Bruand^[3]所述：“随着 TBM 施工性能数据和机器制造水平的不断更新，开发 TBM 性能预测模型应是一项持续性的工作。因为 TBM 技术相对快速发展，可以根据获得的新信息对其进行改进，故预测模型最多使用 8~10 a”。

Q_{TBM} 模型

N. R. Barton^[34]基于收集的 145 条 TBM 隧道施工数据和地质资料，在岩体分级 Q 系统的基础上，考虑岩机相互作用，添加了一些新的参数，提出了可预测 TBM 净掘进速度、利用率和施工速度的 *Q_{TBM}* 模型。其计算公式为

$$Q_{TBM} = \frac{RQD_0 J_r J_w SIGMA}{J_n J_a SRF F_n^{20} / 20^9} \frac{20 q \sigma_\theta}{CLI 20 5} \quad (33)$$

$$PR = 5(Q_{TBM})^{-0.2} \quad (34)$$

$$AR = PRU = PRT^m \quad (35)$$

其中，

$$SIGMA = 5\gamma Q_c^{1/3} \text{ 或 } 5\gamma Q_t^{1/3} \quad (36)$$

$$Q_c = \left(\frac{UCS}{100}\right) Q \text{ (不利节理方向)} \quad (37)$$

$$Q_t = \left(\frac{I_{50}}{4}\right) Q \text{ (有利节理方向)} \quad (38)$$

$$CLI \cong 14 \left(\frac{S_j}{AVS}\right)^{0.385} \quad (39)$$

$$m = m_1 \left(\frac{D}{5}\right)^{0.20} \left(\frac{20}{CLI}\right)^{0.15} \left(\frac{q}{20}\right)^{0.10} \left(\frac{n}{2}\right)^{0.05} \quad (40)$$

式中：*RQD₀* 为沿隧道轴向的 *RQD* 值；*J_n*，*J_r*，*J_a*，

J_w，*SRF* 与 Q 系统中的含义相同；*SIGMA* 为岩体强度；*CLI* 为刀具寿命指数(源于 NTNU 模型)；*q* 为石英含量；*σ_θ* 为沿隧道掌子面的平均双轴应力；*γ* 为岩石密度；*S_j* 为岩石表面硬度值；*AVS* 为钢材磨损值；*T* 为总时间；*m* 为下降梯度(范围：-0.15~0.45；推荐取值 -0.20)；*m₁* 为源于 Q 值的基本值；*D* 为隧道直径；*n* 为孔隙率。

上述公式适用于 *Q_{TBM}* > 1 的情况。当 *Q_{TBM}* 逐渐减小到 1 时，TBM 净掘进速度呈幂函数增加。当 *Q_{TBM}* < 1 时，由于掌子面不稳定、撑靴支撑困难和涌水等问题的出现，为避免因振动导致机器损坏和刀具过度磨损，TBM 司机通常降低推力，从而导致净掘进速度降低。

M. Sapignia 等^[60]基于 3 条总长 14 km 的 TBM 输水隧洞(意大利)，调查得到超过 700 组表征岩体质量特征和 TBM 性能的数据，研究发现 *Q_{TBM}* 对施工速度敏感性极差(见图 6)，记录数据得到的相关系数甚至比传统 *Q* 值或其他基本参数(如岩石单轴抗压强度)的相关系数更差。显然，不能仅用 3 个案例来判断 *Q_{TBM}* 模型的可靠性。

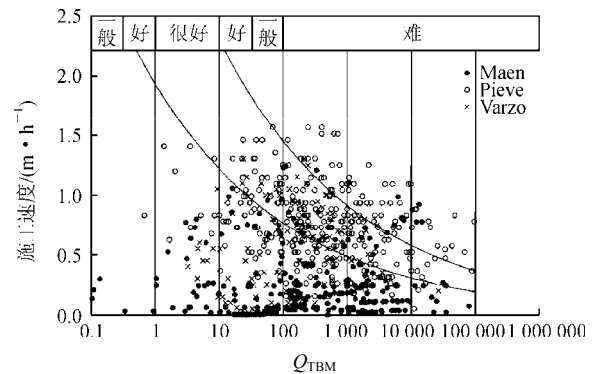


图 6 3 条 TBM 隧道 *Q_{TBM}* 和施工速度之间的关系^[60]
Fig.6 Relationship of *Q_{TBM}* and advance rate for three TBM tunnels^[60]

O. T. Blindheim^[61]在详细分析 *Q_{TBM}* 模型中每一项对 TBM 性能的影响后，发现 *Q_{TBM}* 模型没有阐明岩机之间的相互作用关系，且过于复杂，包含 21 个不同输入参数，同时一些输入参数与 TBM 性能无关，因此不推荐使用 *Q_{TBM}* 模型来进行 TBM 性能预测。A. Palmstrom 和 E. Broch^[62]也认为 *Q_{TBM}* 模型过于复杂，且存在一些错误，也不推荐使用其目前的形式。

Alber 模型

M. Alber^[63]基于总长 55 km 的 TBM 隧道施工性能数据和地质资料，发现 TBM 净掘进速度和岩体

单轴抗压强度之间存在显著的相关性，考虑不同 TBM 刀盘转速和推力的影响后，定义了比贯入度，其表达式为

$$SP = \frac{PR_{ev}}{F_n} \quad (41)$$

式中：SP 为比贯入度(即 FPI 的倒数)。

岩体单轴抗压强度定义为

$$UCS_{cm} = UCS \sqrt{s_a} = UCS \exp \frac{RMR - 100}{9} \quad (42)$$

式中： UCS_{cm} 为岩体单轴抗压强度，RMR 为岩体评分系统。

根据岩体单轴抗压强度和比贯入度之间的概率关系曲线，可以确定比贯入度值，然后根据每转进尺和净掘进速度之间的关系，可以得到净掘进速度，其计算公式为

$$PR = \frac{60 \cdot SP \cdot RPM \cdot F_n}{1000} \quad (43)$$

将机器利用率看作安装支护时间的函数，而安装支护时间取决于开挖岩体的力学行为，用隧道拱顶中心的安全因子来表征，其计算公式为

$$FS = \frac{UCS_{cm}}{\sigma_\theta} \quad (44)$$

式中：FS 为安全因子， σ_θ 为隧道壁切向应力。

M. Alber^[64] 基于超过 100 km 的 TBM 隧道施工性能数据和地质资料，发现隧道拱顶安全因子和机器利用率之间存在显著的相关性，从而根据隧道拱顶安全因子和机器利用率之间的概率曲线关系可以初步确定机器利用率。

根据 TBM 净掘进速度、机器利用率和 TBM 施工速度三者之间的关系，可以确定 TBM 施工速度，其计算公式为

$$AR = PR \cdot U \quad (45)$$

Alber 模型用岩体单轴抗压强度这一参数来综合考虑岩石单轴抗压强度和岩体特征对 TBM 性能的影响，可以起到简化作用，但预测精度也会降低。

神经模糊模型

G. M. Alvarez 等^[65] 基于概率模型数据库的第 1, 2 层次数据组，运用模糊集、模糊逻辑、近似推理、神经网络和数据聚类等方法，开发了神经模糊模型，用于预测 TBM 净掘进速度和施工速度。模糊神经建模方法为利用不确定的岩土信息提供了一个强有力的工具。基于 Takagi-Sugeno 模糊方法^[66] 和最小二乘法，获得预测 TBM 性能的四大规则，每条规

则都是 5 个参数(岩芯裂隙频率、岩石单轴抗压强度、刀盘转速、单刀推力和刀具直径)的线性组合，如下所示：

规则 1：如果 CFF 较低，UCS 中等，RPM 中等， F_n 中等，刀具直径 Dsize 较大，则有

$$PR = -0.73CFF - 0.014UCS + 0.10RPM + 0.0013F_n + 0.0069Dsize + 0.94 \quad (46)$$

规则 2：如果 CFF 中等，UCS 中等，RPM 较快， F_n 中等，Dsize 中等，则有

$$PR = -1.95CFF + 0.055UCS + 0.13RPM + 0.038F_n + 0.045Dsize - 24.65 \quad (47)$$

规则 3：如果 CFF 较高，UCS 较小，RPM 较慢， F_n 较小，Dsize 较小，则有

$$PR = -9.64CFF + 0.14UCS + 3.3RPM + 0.051F_n - 0.0097Dsize + 1.32 \quad (48)$$

规则 4：如果 CFF 中等~较高，UCS 较大，RPM 较快， F_n 较小，Dsize 较大，则有

$$PR = -1.46CFF + 0.062UCS + 1.94RPM + 0.35F_n - 0.27Dsize - 8.085 \quad (49)$$

式中：CFF 为岩芯裂隙频率。

相比于传统统计分析建模方法，神经模糊建模方法得到的结果更加准确。出于实用性考虑，神经模糊建模方法不失为岩土工程实践中的一大进步。

RME 模型

Z. T. Bieniawski 等^[35] 在韩国 ITA 会议上第一次发布关于岩体可开挖性(RME)的概念。岩体可开挖性(Excavability)定义为开挖的难易程度。基于对收集的 387 组有效数据进行统计分析，选用 5 个主要参数(完整岩石单轴抗压强度、可钻性、不连续面性质、自稳时间和地下水流量)，开发了新的 RME 评分系统，RME 值越高，岩体开挖越容易；基于西班牙和埃塞俄比亚的隧道施工性能数据和地质资料，开发了双护盾 TBM RME 和平均施工速度 ARA_T 之间的对应关系式；基于德国、瑞士和西班牙的隧道施工性能数据和地质资料，开发了敞开式 TBM 和单护盾 TBM RME 和 ARA_T 之间的对应关系式。其适用于敞开式和单护盾 TBM 的 RME 评分系统如表 2^[38] 所示(适用于双护盾 TBM 的 RME 评分系统。有所不同，输入参数的阶梯分级和评分有轻微改变)。

当单轴抗压强度分别为 20 和 130 MPa，而其他输入参数相同时，两节段隧道岩体将有相同的 RME 值。显然 TBM 在 $UCS = 20$ MPa 的节段隧道中获得的平均施工速度比在 $UCS = 130$ MPa 的节段隧道中

表 2 RME 输入参数评分表^[38]
Table 2 Ratings for RME input parameters^[38]

完整岩石的单轴抗压强度		可钻性		隧道掌子面前方不连续面性质			自稳时间		地下水流量	
取值/MPa	评分	DRJ 取值	评分	参数	取值	评分	取值/h	评分	取值/(L · s ⁻¹)	评分
< 5	4	> 80	15	同质性	均质	10	< 5	0	> 100	0
					非均质	0				
5 ~ 30	14	80 ~ 65	10	每米节理数	0 ~ 4	2	5 ~ 24	2	70 ~ 100	1
					4 ~ 8	7				
30 ~ 90	25	65 ~ 50	7	与隧道轴 向的关系	8 ~ 15	15	24 ~ 96	10	30 ~ 70	2
					15 ~ 30	10				
90 ~ 180	14	50 ~ 40	3	垂直	> 30	0	96 ~ 192	15	10 ~ 30	4
					斜交	3				
> 180	4	< 40	0	平行	垂直	5	> 192	25	< 10	5
					斜交	3				
					平行	0				

获得的平均施工速度要高。当 $UCS = 45 \text{ MPa}$ 时，根据 RME 评分可获得最高的平均施工速度。因此，将 UCS 分为大于和小于 45 MPa 两个范围来分别讨论。

基于调查总长 $1\ 724 \text{ m}$ 的敞开式 TBM 隧道，获得 49 组有效节段数据，统计分析得到敞开式 TBM RME 和 ARA_T 之间的关系。

当 $UCS > 45 \text{ MPa}$ 时，有

$$ARA_T = 0.839RME - 40.8 \quad (50)$$

当 $UCS < 45 \text{ MPa}$ 时，有

$$ARA_T = 0.324RME - 6.8 \quad (51)$$

基于调查总长 $3\ 620 \text{ m}$ 的单护盾 TBM 隧道，获得 62 组有效节段数据，统计分析得到单护盾 TBM RME 和 ARA_T 之间的关系。

当 $UCS > 45 \text{ MPa}$ 时，有

$$ARA_T = 23 \left[1 - 24 \frac{(45 - RME)}{17} \right] \quad (52)$$

当 $UCS < 45 \text{ MPa}$ 时，有

$$ARA_T = 10 \ln RME - 13 \quad (53)$$

基于调查总长 20.7 km 的双护盾 TBM 隧道，获得 225 组有效节段数据，统计分析得到单护盾 TBM RME 和 ARA_T 之间的关系。

当 $UCS > 45 \text{ MPa}$ 时，有

$$ARA_T = 0.422RME - 11.6 \quad (54)$$

当 $UCS < 45 \text{ MPa}$ 时，有

$$ARA_T = 0.661RME - 20.4 \quad (55)$$

RME 评分系统除可用于评价岩体开挖的难易

程度外，还可用于选择特定地质条件下最佳类型的 TBM，如图 7^[38]和 8^[38]所示。

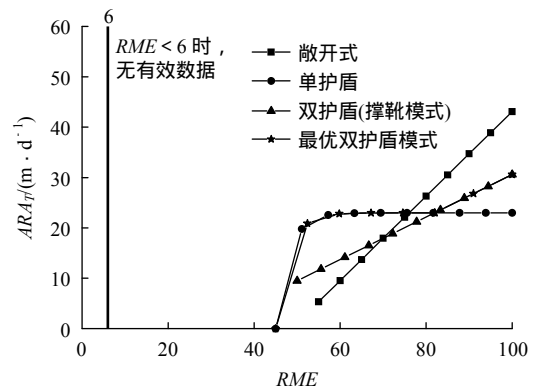


图 7 不同类型 TBM 的 RME 和 ARA_T 之间的关系($UCS > 45 \text{ MPa}$)^[38]

Fig.7 Relationship between RME and ARA_T for different types of TBMs($UCS > 45 \text{ MPa}$)^[38]

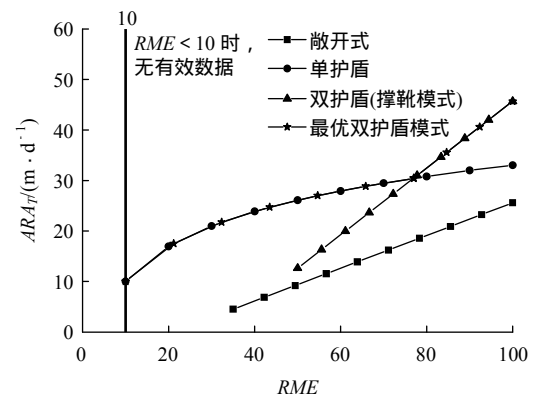


图 8 不同类型 TBM 的 RME 和 ARA_T 之间的关系($UCS < 45 \text{ MPa}$)^[38]

Fig.8 Relationship between RME and ARA_T for different types of TBMs($UCS < 45 \text{ MPa}$)^[38]

从图 7 可以看出，当 $UCS > 45 \text{ MPa}$ ， RME 75

时，3 类 TBM 的平均施工速度大致相同，约为 22 m/d；当 $RME > 75$ 时，敞开式 TBM 施工性能最佳；当 $RME < 75$ 时，单护盾 TBM 施工性能最佳；在 RME 的整个范围内，双护盾 TBM(撑靴模式)施工性能最差。

从图 8 可以看出，当 $UCS < 45$ MPa 时，在 RME 的整个范围内，优化的双护盾 TBM 施工性能最佳，敞开式 TBM 施工性能最差。当 $RME < 77$ 时，单护盾 TBM 施工性能最佳，虽然优化的双护盾 TBM 可以获得类似性能，但单护盾 TBM 前期投资更小，若整条隧道大部分岩体 $RME < 77$ ，应优先选用单护盾 TBM。

基于 RME 和 ARA_T 之间的关系，计算得到平均施工速度预测值 ARA_T ，采用施工人员效率因子、适应地质因子和隧道直径因子进行修正后，可以得到平均施工速度记录值 ARA_R ，其计算公式为

$$ARA_R = ARA_T F_E F_A F_D \quad (56)$$

其中，

$$F_E = 0.7 + F_{E1} + F_{E2} + F_{E3} \quad (57)$$

$$F_D = \frac{10}{D} \quad (58)$$

式中： F_E 为施工人员效率因子， F_A 为适应地质因子， F_D 为隧道直径因子， F_{E1} 为施工方 TBM 隧道施工经验因子， F_{E2} 为施工人员素质因子， F_{E3} 与现场有无制造商代表和解决问题时间长短有关。

RME 模型不仅可用于预测平均施工速度，还可以用于选择给定地质条件下最佳类型的 TBM。这是第一次采用量化指标来进行 TBM 选型，比以往根据地质条件进行 TBM 选型的模糊概念迈进了一大步。此外， RME 模型还采用定量指标来量化施工人员效率和隧道直径等因素对 TBM 平均施工速度的影响，更加符合实际，也更实用。

Farrokh 模型

E. Farrokh 等^[67]基于超过 300 条 TBM 隧道施工性能数据和地质资料，开发了一个新的 TBM 性能预测模型，集中量化主要因素的影响，如隧道直径、岩石类型、岩石单轴抗压强度和刀盘转速等。对数据库中数据进行多元回归分析后，得到刀盘每转进尺预测公式为

$$PR_{ev} = \exp(0.41 + 0.404D - 0.027D^2 + 0.069 1RT_c - 0.004 31UCS + 0.090 2RQD_c + 0.000 893F_n) \quad (59)$$

式中： RT_c 为岩石类型代码(1 代表 G 和 GN ，2 代表 MV ，3 代表 SLK ，5 代表 C)， RQD_c 为 RQD 代码(1 代表 $RQD = 90\% \sim 100\%$ ，2 代表 $60\% < RQD < 90\%$ ，3 代表 $RQD < 60\%$)。

对数据库中数据进行多元回归分析后，得到 TBM 净掘进速度预测公式为

$$PR = \frac{F_n^{0.186} RQD_c^{0.133} RPM^{0.63} D^{5.47} \exp(0.046D^2)}{5.64UCS^{0.248} \exp(1.58D)} \quad (60)$$

Farrokh 模型的最突出特征是在模型中考虑了岩石类型对净掘进速度 PR 的影响，将岩石分为 7 种类型，前 4 种为“沉积岩”，第 5，6，7 种分别为“变质岩”、“花岗质岩石”和“火成岩”。

特例模型

针对特定的一条或几条隧道开发的 TBM 性能预测模型称为特例模型。

R. Ribacchi 和 A. L. Fazio^[68]基于意大利 Varzo TBM 隧道施工性能数据和地质资料，研究了高强度、低破碎性片麻岩地层中岩体质量对双护盾 TBM 施工性能的影响，发现节理间距对双护盾 TBM 性能影响最大。同时研究了岩体单轴压缩强度和比贯入度^[63]之间的关系：

$$SP = 250UCS_{cm}^{-2/3} \quad (61)$$

S. Yagiz^[69]基于调查 7.5 km 的纽约皇后 TBM 隧道施工性能数据和地质资料，对获得的 151 组有效数据进行统计分析后，运用 4 个岩体参数(岩石单轴抗压强度、峰值斜率指数、节理间距和节理面方向)得到了一个 TBM 净掘进速度预测模型。研究结果表明岩体性质强烈影响 TBM 净掘进速度。TBM 净掘进速度预测公式为

$$PR = 1.093 + 0.029PSI - 0.003UCS + 0.437 \lg \alpha - 0.219J_s \quad (62)$$

Q. M. Gong 和 J. Zhao^[70]等基于总长 22.4 km 的新加坡 DTSS 项目 T05 和 T06 隧道的 TBM 施工性能数据和地质资料，对获得的 47 有效数据进行非线性回归分析后，运用 4 个岩体参数(岩石单轴抗压强度、脆性、节理体积数、节理方向)，提出了一个新的预测岩体可掘性的岩体特性预测模型，其预测公式为

$$BI \approx BI_{(1)} PR_{ev}^{-0.75} \quad (63)$$

$$BI_{(1)} = 37.06UCS^{0.26} BI^{-0.10} [0.84e^{-0.05J_v} + e^{-0.09 \sin(\alpha+30)}] \quad (64)$$

其中，

$$Bi = \frac{UCS}{BTS} \quad (65)$$

式中： BI 为岩体可掘性指数， $BI_{(i)}$ 为特征可掘性指数， Bi 为岩石脆性指数， J_v 为体积节理数。

岩体特性预测模型依据 TBM 破岩规律，采用易得的岩石试验数据对 TBM 净掘进速度进行预测，但其缺点是模型开发依据的数据有限，其适用性受到一定的限制。此外，岩体特性预测模型仅能预测净掘进速度，还需进一步扩展。

J. Hassanpour 等^[71]基于调查 5.3 km 的 Zagross No.2 输水隧洞(伊朗)TBM 施工性能数据和地质资料，得到 37 组有效数据，对数据进行回归分析后，开发了一个新的 TBM 性能预测模型。基于简单回归分析得到的 TBM 性能预测公式为

$$FPI = 0.116RMCI + 11.85 \quad (66)$$

其中，

$$RMCI = UCS \left(\frac{RQD}{100} \right)^{2/3} \quad (67)$$

式中： $RMCI$ 为岩体切割性指数， RQD 为岩石质量指标。

基于多元回归分析得到的 TBM 性能预测方程为

$$FPI = \exp(0.004UCS + 0.008RQD + 2.077) \quad (68)$$

J. Hassanpour 等^[72]使用相同的方法，基于总长 15.9 km 的 Karaj 输水隧洞(伊朗)TBM 施工性能数据和地质资料，获得 40 组有效数据，对数据进行回归分析后，开发了一个新的 TBM 性能预测模型。基于简单回归分析得到的 TBM 性能预测公式为

$$FPI = 7.887 \ln(UCS) - 18.497 \quad (69)$$

基于多元回归分析得到的 TBM 性能预测方程为：

$$FPI = \exp(0.005UCS - 0.002J_s^{-2} + 2.338) \quad (70)$$

J. Hassanpour 等^[73]基于 4 条总长 55.4 km 的 TBM 隧道施工性能数据和地质资料，对获得的 158 组有效数据进行统计分析后，开发了一个新的 TBM 性能预测模型。分析结果表明岩体参数(如岩石单轴抗压强度、节理间距和 RQD)和现场贯入度指数 FPI 之间存在明显的相关性，其表达式为

$$FPI = \exp(0.008UCS + 0.015RQD + 1.384) \quad (71)$$

H. J. Khademi 等^[74]研究发现，用 RMR 精确预

测 TBM 现场贯入度指数 FPI 是行不通的。通过对 RMR 的输入参数进行多元线性、非线性和多项式回归分析可以改变这一状况，这突出了基于岩体分类的多元模型在预测 TBM 性能时的强大潜力。基于总长 8.5 km 的 Zagross No.2 输水隧洞(伊朗)TBM 施工性能数据和地质资料，得到 46 组有效数据， FPI 和岩体参数之间的多元线性关系为

$$FPI = 4.061 + 0.091UCS + 0.077RQD + 0.117J_c + 1.077 \lg \alpha \quad (72)$$

FPI 和岩体参数之间的幂函数关系为

$$FPI = 10^{(0.866 + 0.002UCS + 0.002RQD + 0.004J_c + 0.029 \lg \alpha)} \quad (73)$$

FPI 和岩体参数之间的指数关系为

$$FPI = \exp[1.995 + 0.004UCS + 0.005RQD + 0.01J_c + 0.068 \lg \alpha] \quad (74)$$

FPI 和岩体参数之间的对数关系为

$$FPI = 1.828UCS^{0.313} RQD^{0.207} J_c^{0.044} \alpha^{0.012} \quad (75)$$

FPI 和岩体参数之间的多项式关系为

$$FPI = 9.401 + 0.397 \lg \alpha + 0.011J_c^2 + 1.14E - 5RQD^3 + 1.34E - 8UCS^4 \quad (76)$$

上述关系仅对地质条件类似于 Zagros 隧道的情况才有效，需要进行更深入的研究来扩展该模型，最终开发一个通用模型。

A. Delisio 等^[75]基于 Lotschberg Base 隧道(瑞士)TBM 施工性能数据和地质资料，得到 160 组有效数据，研究了块状岩体条件对 TBM 性能的影响。块状岩体条件会对 TBM 性能产生一系列的负面影响，如岩体节理会引起掌子面不稳定，掌子面不规则岩体会引起刀盘振动，岩碴中岩块会损坏出碴输送系统等。块状不规则掌子面条件下，并不是所有的刀具都与掌子面接触，刀具荷载将从不与掌子面接触的刀具转移到与掌子面接触的近邻刀具上，故 TBM 总推力将分布于更少的刀具上，单刀推力并不是常值，故块状岩体条件下的现场贯入度指数被定义为 TBM 总推力和刀盘每转进尺之间的比值。通过多元回归分析，建立了块状岩体条件下的 TBM 性能预测模型，得到现场贯入度指数和 2 个岩体参数(体积节理数和岩石单轴抗压强度)之间的关系，其表达式为

$$FPI_{blocky} = \frac{TF}{PRev} = 5\ 952 - 1\ 794 \ln J_v + UCS \quad (77)$$

式中： FPI_{blocky} 为块状岩体条件下的现场贯入度指数。

A. Delisio 和 J. Zhao^[76] 基于 2 条总长 28.2 km 的块状岩体隧道 TBM 施工性能数据和地质资料，考虑 TBM 摩擦力和隧道直径的影响后，对块状岩体条件下的现场贯入度指数进行了修正。通过多元回归分析，基于体积节理数和完整岩石单轴抗压强度，引入了新的预测 FPI_{blocky} 的表达式：

$$FPI_{blocky} = \frac{(TF - f) / D}{PRev_{blocky}} \quad (78)$$

$$FPI_{blocky} = e^{6.00} J_v^{-0.82} UCS^{0.17} \quad (79)$$

TBM 掘进时，一般认为滚刀破岩形成的每条同心圆轨迹上只作用一把滚刀，故上式应用 $2(TF - f) / D$ 来表征净推力密度。

总而言之，特例模型的最大缺点是由于收集的数据有限，其普适性受到很大限制，但特例模型一般针对一些具有特殊特征的隧道开发，相比于普适性较强的通用模型，此时特例模型的 TBM 性能预测精度反而更好。

4 影响 TBM 性能的主要因素分析

表 3 列出了国内外开发的各种 TBM 性能预测模型，由于篇幅有限，各模型的预测公式未列入其中，但可在上文一一找到。从表 3 中可以得到各模型的开发者、年代和所依据的数据库信息。数据库中包括调查隧道的数量和长度、获得的有效数据组数、各岩体参数和机器参数的范围等。根据上述信息可以判断各模型的适用范围和普适性。如果拟开挖隧道的岩体参数和机器参数与上述模型中某一模型的岩体参数和机器参数相似，可用相应预测模型对该隧道的 TBM 性能进行预测。

由于目前国内还没有一个可靠的 TBM 性能预

测模型，而国外早期开发的简单经验模型因考虑因素较少，预测精度有限，故此处不考虑国内模型和国外简单经验模型，只统计国外理论模型和复杂经验模型(总计 17 个)中各岩体参数和机器参数的使用频率。

国外理论模型和复杂经验模型(总计 17 个)中各岩体参数的使用频率如图 9 所示，可以看出，用于预测 TBM 性能的所有岩体参数中使用频率最高的是表征不连续面间距的参数，包括 RQD ， J_v ， J_s 和 CFE (累计 15 次)；第二是表征岩石强度的岩石单轴抗压强度 UCS (12 次)，第三是不连续面和隧道轴向夹角 α (6 次)，第四是隧道直径 D (5 次)，第五是岩石脆性指数 Bi (4 次，峰值斜率指数 PSI 和 S_{20} 用于表征岩石脆性，也归为此类)。应注意刀具寿命指数 CLI 和石英含量 q 仅用于预测刀具磨损。

国外理论模型和复杂经验模型(总计 17 个)中各机器参数的使用频率如图 10 所示，可以看出，用于预测 TBM 性能的所有机器参数中使用频率最高的是单刀推力 F_n (8 次)，第二是刀盘转速 RPM (4 次)，第三是刀具直径 $Dsize$ (3 次，刀具半径 R 也归为此类)，第四是刀间距 Sp (2 次)，最后是刀具刀尖宽度 T (1 次)和滚刀岩石接触角 ϕ (1 次)。

基于以上统计结果，下文详细讨论各参数对 TBM 性能的影响。

4.1 岩体参数对 TBM 施工性能的影响

(1) 普遍认为岩体不连续性(如节理间距和节理方向等)是影响 TBM 施工性能的最主要因素。岩体中的不同节理间距和节理方向，会导致滚刀下的裂纹起裂和扩展模式发生改变。随着节理间距的减小，净掘进速度显著增加，当节理间距处于 20 ~ 40 cm 时，净掘进速度达到最大值^[69]。当节理间距小于 20 cm 时，由于隧道掌子面围岩出现不稳定情况，导致停机时间增加，同时围岩支护耗时也增加，从而，施工速度大大减小。节理化岩体中的最大净掘进速

表 3 国内外 TBM 性能预测模型一览表
Table 3 TBM performance prediction models at home and abroad

来源	年份	数据库	
		岩体参数	机器参数
H. P. Sanio ^[39]	1985	-	-
R. J. Boyd ^[40]	1986	-	-
J. Rostami ^[32]	1997	$UCS = 30 \sim 250$ MPa, 未提及其他参数的范围	
S. Yagiz ^[43]	2002	纽约皇后隧道，隧道总长 7.5 km，151 组有效数据，曼哈顿片岩、片麻岩、角闪岩， $UCS = 115 \sim 200$ MPa， $BTS = 6.5 \sim 11.5$ MPa， $J_s = 0.2 \sim 2$ m， $\alpha = 2^\circ \sim 89^\circ$	曼罗宾斯 235 ~ 282(敞开式)，50 把 19 寸滚刀，TBM 直径 7.06 m，推力：17 150 kN，扭矩：3 618.5 kN·m，功率：3 147 kW，转速：0 ~ 8.3 r/min
A. Ramezanzadeh 等 ^[44]	2005	11 条总长超过 60 km 的 TBM 隧道施工性能数据和地质资料	

续表

来源	年份	数据库	
		岩体参数	机器参数
P. J. Tarkoy ^[45]	1973	总硬度为 2~242 的石灰岩、页岩、砂岩、石英岩、片岩、白云岩	0.076 PR 3.716
P. C. Graham ^[46]	1976	UCS = 140~200 MPa	-
I. W. Farmer 和 N. H. glossop ^[47]	1980	8 条 TBM 隧道施工性能数据和地质资料	
F. Cassinelli 等 ^[48]	1982	RSR	-
R.A.Snowdon 等 ^[49]	1982	砂岩、玄武岩、花岗岩, UCS = 50~340 MPa, BTS = 3.5~27.5 MPa, BI = 11~17.5	-
P. Nelson 等 ^[50]	1983	4 条沉积岩 TBM 隧道施工性能数据和地质资料, 页岩、砂岩、石灰岩	
W. E. Bamford ^[51]	1984	2 条 TBM 隧道施工性能数据和地质资料(澳大利亚), 层间距为 0.3~0.5 m	
E. Büchi ^[52]	1984	总长 38 km 的 TBM 隧道施工性能数据和地质资料	
H. M. Hughes ^[53]	1986	煤岩	
N. Innaurato 等 ^[54]	1991	5 条总长 19 km 的 TBM 隧道施工性能数据和地质资料, 112 组有效数据	
N. O. Sundin 和 S. Wänstedt ^[55]	1994	UCS : 65~200 MPa, I _{s(50)} : 1~9 MPa, CAI : 1.9~5.9, 韧性: 2.2~2.3, 云母片岩、片麻岩、花岗岩	
J. E. O'Rourke 等 ^[56]	1994	变质岩	
P. P. Nelson 等 ^[57]	1994	640 条 TBM 隧道施工性能数据和地质资料	-
A. Bruland ^[3]	1998	35 条总长超过 250 km 的 TBM 隧道施工性能数据和地质资料, DRI = 20~80, UCS = 25~350 MPa, n < 10%, J _s > 50 mm	
N. R. Barton ^[34]	1999	未提及收集了多少条 TBM 隧道施工性能数据和地质资料, Q _{TBM} > 1	
M. Sapigni 等 ^[60]	2002	3 条隧道(意大利), 总长 14 km, 700 多组有效数据	维尔特 340/420 E, 罗宾斯 1111-234-3, 罗宾斯 1214-240
M. Alber ^[63]	2000	超过 100 km 的 TBM 隧道施工数据和地质资料	
G. M. Alvarez 等 ^[65]	2000	超过 640 条 TBM 隧道施工性能数据和地质资料	
Z. T. Bieniawski 等 ^[35, 38]	2007, 2008	总长 1 724 m 的敞开式 TBM 隧道, 49 组有效数据; 总长 3 620 m 的单护盾 TBM 隧道, 62 组有效数据; 总长 20.7 km 的双护盾 TBM 隧道, 225 组有效数据	
E. Farrokh 等 ^[67]	2012	260 多条 TBM 隧道施工性能数据和地质资料, 超过 300 组有效数据, 隧道直径: 1.63~11.74 m	
R. Ribacchil 等 ^[68]	2005	Varzo 隧道(意大利), 研究隧道总长 4.5 km, 片麻岩, UCS = 100~200 MPa, RMR = 70%~90%	罗宾斯 1214-240(双护盾), 27 把 17 寸滚刀, TBM 直径 3.84 m 推力: 900 kN, 扭矩: 558 kN·m, 功率: 700 kW, 转速: 0~9 r/min
宋克志等 ^[15]	2008	重庆越江隧道, 总长 925 m, 泥岩、砂岩交互地层, UCS: 7.3~21.9 MPa(泥岩), UCS: 26.7~69.4 MPa(砂岩)	泥水加压平衡盾构。17 寸滚刀, 外径 6.57 m, 推力: 37 000 kN, 脱困扭矩: 3 500 kN·m, 扭矩: 3 050 kN·m(4r/min), 转速: 0~5 r/min
S. Yagiz ^[69]	2008	同上(S.Yagiz, 2002)	
温森等 ^[16]	2009	同上(S.Yagiz, 2002)	
Q. M. Gong 和 J. Zhao ^[70]	2009	DTSS 项目 T05 和 T06 隧道(新加坡), 总长 22.2 km, 47 组有效数据, 花岗岩(主要类型)、砂岩, UCS: 100~260 MPa, Bi: 8~22, J _c : 0~30 Joint/m ³ , α角: 10°~80°	2 台海瑞克 EPB TBMs, 直径分别为 4.88 和 4.45 m, T05 中的 TBM 推力: 26 600 kN, 改进后滚刀数量由 35 把降低为 33 把, 刀间距由 90 mm 增大为 100 mm
J. Hassanpour 等 ^[71]	2009	Zagross2 [#] 输水隧洞(伊朗), 研究隧道总长 5.3 km, 37 组有效数据, 碳酸盐-黏土质岩石(石灰岩、页岩), UCS: 30~150 MPa, RQD: 40%~100%, J _s : 0.15~0.5 m	海瑞克 S-157(双护盾), 42 把 17 寸滚刀, TBM 直径 6.73 m 推力: 28 134 kN, 扭矩: 4 450 kN·m(9 rpm), 功率: 2 100 kW, 转速: 0~11 r/min, 刀间距: 90 mm
J. Hassanpour 等 ^[72]	2010	Karaj 输水隧洞(伊朗), 总长 15.9 km, 40 组有效数据, 火成碎屑岩(凝灰岩、砂岩、粉砂岩等), UCS = 30~150 MPa, BTS = 5~12 MPa, J _s = 0.1~0.8 m, α = 30°~70°	海瑞克 TBM(双护盾), 31 把 17 寸滚刀, TBM 直径 4.65 m, 推力: 16 913 kN, 扭矩: 1 029 kN·m(11 rpm), 功率: 1 250 kW, 转速: 0~11 r/min, 刀间距: 90 mm
J. Hassanpour 等 ^[73]	2011	4 条隧道(3 条来自伊朗, 1 条来自新西兰), 总长 55.4 km, 158 组有效数据, 覆盖三大类型岩石, UCS = 20~240 MPa, RQD = 10%~100%	1 台海瑞克双护盾 TBM(4.65 m), 1 维尔特双护盾 TBM(4.525 m), 1 台海瑞克双护盾 TBM(6.73 m), 1 台罗宾斯敞开式 TBM(4.65 m)
H. J. Khademi 等 ^[74]	2010	Zagross2 [#] 输水隧洞(伊朗), 研究隧道总长 8.5 km, 46 组有效数据, 沉积岩(石灰岩、石灰质页岩、灰岩等), UCS = 20~150 MPa, RQD = 30%~95%, J _c 评分: 10~22, α = 1°~70°	海瑞克 S-157(双护盾), 42 把 17 寸滚刀, TBM 直径 6.73 m, 推力: 28 134 kN, 扭矩: 4 747 kN·m, 功率: 2 100 kW, 转速: 0~9 r/min, 刀间距: 90 mm
A. Delisio 等 ^[75]	2013	Lötschberg Base 隧道(瑞士), 研究隧道总长 18.5 km, 160 组有效数据, 片麻岩、花岗岩、角闪岩、花岗闪长岩, UCS = 130~270 MPa, BTS = 11~19 MPa, CAI = 3.3~5.2, J _c = 5~25 Joint/m ³	2 台海瑞克 S-167(敞开式), 60 把 17 寸滚刀, TBM 直径 9.43 m 推力: 16 000 kN, 扭矩: 8 825 kN·m, 转速: 0~6 r/min, 刀间距: 90 mm
A. Delisio 和 J. Zhao ^[76]	2014	2 条隧道, 研究隧道总长 28.2 km, 片麻岩、花岗岩、角闪岩、花岗闪长岩, UCS = 50~270 MPa, J _c = 5~25 Joint/m ³ , α = 10°~90°	2 台海瑞克敞开式 TBM(9.43 m), 1 台罗宾斯敞开式 TBM(10.05 m)

注: “-”表示无相关数据。

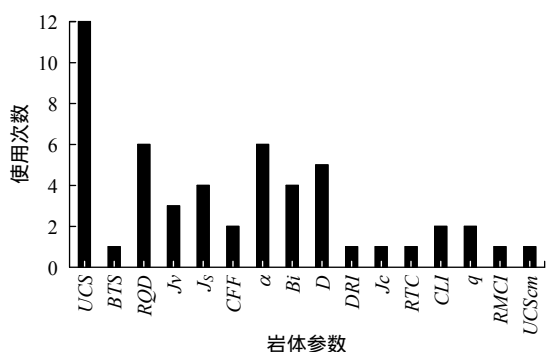


图 9 17 个模型中各岩体参数的使用频率图

Fig.9 Use frequency of each rock mass parameter in the 17 models

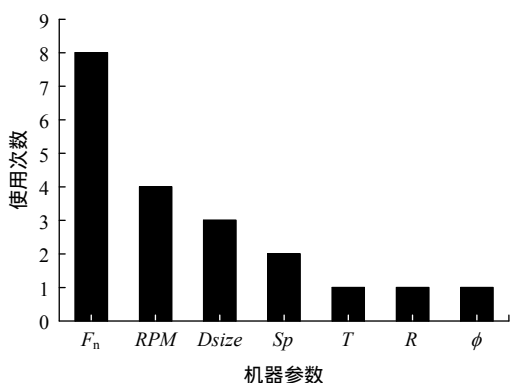


图 10 17 个模型中各机器参数的使用频率图

Fig.10 Use frequency of each machine parameter in the 17 models

度可达到完整岩石材料中净掘进速度的 9 倍^[68-70]。

(2) 节理面和隧道轴向之间的夹角 α 也会显著影响 TBM 施工性能。随着 α 的增加,净掘进速度逐渐增大,当 α 为 $50^\circ \sim 65^\circ$ 时,净掘进速度达到最大值,随着 α 的继续增加,净掘进速度逐渐减小。由于最优 α 角与节理间距有关,当研究最优 α 角对净掘进速度的影响时,必须指明对应的节理间距^[3]。

(3) 岩石单轴抗压强度 UCS 是另一个影响 TBM 施工性能的重要参数。基于滚刀破岩机制,滚刀破岩是滚刀下岩石拉破坏和剪破坏的综合结果,TBM 正是利用岩石抗拉强度和抗剪强度明显小于抗压强度这一特征设计的,岩石抗压强度和抗压强度、抗剪强度显著相关,且实验室普遍采用岩石单轴抗压强度来表征岩石的强度特征,故选取岩石单轴抗压强度来评价 TBM 施工性能^[9]。当岩石单轴抗压强度很高时,净掘进速度很低,但相应围岩无需支护,出渣顺利,TBM 利用率很高,施工速度中等。当岩石单轴抗压强度中等时,净掘进速度中等,围岩支护耗时较少,出渣顺利,TBM 利用率较高,施

工速度很高。当岩石单轴抗压强度很小时,净掘进速度很高,围岩支护耗时极高,出渣较为顺利,TBM 利用率极低,施工速度极低。

(4) 隧道直径 D 也会显著影响 TBM 施工性能。因为不同直径隧道需要不同直径 TBM 开挖,而大直径 TBM 开挖岩体时受到的破岩阻力更大,导致其每转进尺显著小于小直径 TBM 每转进尺。同时,大直径隧道的刀具检查和更换耗时更多。

(5) 滚刀破岩时岩体中压碎区的形状和大小、裂纹扩展的模式和范围与岩石脆性 Bi 密切相关。A. Bruland 等^[3, 43, 77]对此进行了研究,证实随着岩石脆性的增加,净掘进速度逐渐增大。

(6) 岩石类型 RT_c 会影响 TBM 施工性能。因为不同类型岩石的不同结构(胶结方式、颗粒大小和形状等)会显著影响 TBM 净掘进速度。一般情况下,TBM 在沉积岩中获得的净掘进速度比在岩浆岩和变质岩中获得的净掘进速度大。

(7) 地下水一般会降低岩石强度和脆性,改变节理面条件,增加岩石蚀变性,但目前普遍认为地下水状况对净掘进速度影响不大。然而,地下水状况会导致围岩稳定性下降,恶化 TBM 工作条件,降低 TBM 利用率,从而影响 TBM 施工速度。极端情况下甚至会发生突涌水,严重阻碍 TBM 施工。在已发生的 TBM 重大工程事故中,约有 35%系突涌水引起^[78]。

(8) 地应力对 TBM 性能影响的研究还不够深入,但可以肯定地应力的大小和方向会影响 TBM 的净掘进速度和施工速度。高地应力条件下软弱岩体有可能发生围岩大变形,增加 TBM 卡机风险;高地应力条件下硬脆性岩石有可能发生岩爆,危及施工人员和 TBM 的安全,严重影响 TBM 施工。在已发生的 TBM 重大工程事故中,约有 37%系围岩大变形引起,约有 14%系岩爆引起^[78]。

4.2 机器参数对 TBM 施工性能的影响

(1) 单刀推力 F_n (或 TBM 总推力 TF)是影响 TBM 施工性能最重要的机器参数。随着单刀推力的增大,TBM 净掘进速度显著增大。从 NTNU 模型的发展历程来看,不考虑单刀推力影响的 TBM 性能预测模型,其预测结果存在明显的误差。为保证 TBM 性能预测结果的准确性,必须考虑单刀推力的影响。通常情况下,当开挖岩石强度较高时,TBM 额定推力是限制净掘进速度继续增大的主要控制因素。当开挖岩石强度较低时,皮带出渣压力或 TBM 额定扭矩是限制净掘进继续增大的主要控制因素。

(2) 刀盘转速 RPM 也会显著影响 TBM 施工性能, 因为 TBM 净掘进速度是刀盘每转进尺和刀盘转速的乘积。刀盘转速与 TBM 直径密切相关, TBM 直径越大, 刀盘转速越低, 并且大直径 TBM 的每转进尺比小直径 TBM 小, 故大直径 TBM 的净掘进速度相对较低。

(3) 刀具直径 $Dsize$ 无疑会影响 TBM 施工性能。目前的发展趋势是采用大直径滚刀(如 19 和 20 英寸滚刀), 因为大直径滚刀的轴承负荷能力显著提升, 其次采用大直径滚刀可以适当增加滚刀间距, 减小刀盘刀具安装数量, 增加等效单刀推力和开口率, 从而提高滚刀破岩效率。同时由于大直径滚刀允许磨损量较多, 可以减少刀具更换次数, 等效增加有效掘进时间, 从而提高 TBM 施工速度。

(4) 刀间距 S_p 显著影响滚刀的切割效率, 进而影响 TBM 施工性能。在一定的贯入度下, 当刀间距过小时, 滚刀破岩形成的岩片过度破碎, 比能较高; 刀间距增大到某一值时, 滚刀破岩形成的岩粉和岩片比例达到最优, 比能最小; 当刀间距过大时, 滚刀之间的相互作用降低, 比能再次增加。由表 3 可知, 目前常用的滚刀间距为 90 mm。

(5) 滚刀刀尖宽度 T 与滚刀破岩时刀具下的应力场密切相关。由于 V 型滚刀磨损过快, 导致刀具下的应力场时常变化, 不利于 TBM 操作, 而常截面滚刀(CCS 滚刀)因其刀尖宽度基本不变, 破岩效率波动不大, 自 20 世纪 70 年以来逐渐替换了 V 型滚刀。

(6) 滚刀岩石接触角 ϕ 与滚刀半径 R 和贯入度 p 有关。滚刀岩石接触角影响滚刀与岩石表面的接触面积, 进而影响滚刀受力分布状况。滚刀法向力(等效单刀推力)对 TBM 施工性能起决定性作用, 故滚刀岩石接触角也会影响 TBM 施工性能。

4.3 人为因素对 TBM 施工性能的影响

除上述岩体参数和机器参数会影响 TBM 施工性能以外, 人为因素也会影响 TBM 施工性能。

(1) 施工方的 TBM 隧道施工经验、施工人员的训练水平和资质、现场有无 TBM 制造商代表、备用零件是否充足、处理问题的时间长短等因素都会显著影响 TBM 施工性能^[38]。

(2) 一般情况下, TBM 司机操纵 TBM 掘进一定距离后, 当遇到类似地层时, 根据“学习曲线”的影响, 其对处理类似地层的适应性显著增加, 施工速度将远远高于预期值。据资料显示, 当 TBM 司机累计开挖距离达到 10 km 时, TBM 施工性能将

提高 15% 左右^[35]。

(3) 此外, 良好的施工环境和安全后勤保障也会显著影响 TBM 施工性能。

5 讨 论

目前国内在 TBM 性能预测模型研究方面进展缓慢, 而国外在这一方面的研究成果比较丰富, 从国外的 TBM 性能预测模型发展历程来看, 可以得到以下经验:

(1) 目前国内可进行室内全尺寸切割试验的设备较少, 要想根据大量室内全尺寸切割试验数据开发理论 TBM 性能预测模型暂时是行不通的。只有通过收集大量的 TBM 施工现场数据和相应地质资料, 组建一个大型的 TBM 施工性能数据库, 开发经验 TBM 性能预测模型。

(2) 联合业主、设计院、施工方和科研人员, 共同收集所需数据, 既要保证数据库中数据的数量, 也要保证数据库中数据的可靠性和代表性。由于 TBM 机具和安装管片妨碍了掌子面周围围岩的观察, 目前用于表征岩体不连续性的参数(如节理间距、体积节理数和节理方向等)大多都带有主观臆测性, 很难保证参数的可靠性。通过施工方每日地质素描质量控制, 并结合岩体声波测试可以改变这一状况。

(3) 目前国外 TBM 性能预测模型中使用的参数大多与岩体评分系统 RMR 有关, 而国内评价围岩稳定性大多使用 BQ 法, 故可结合 BQ 法中的输入参数和对 TBM 性能预测起决定性的其他参数, 开发适用于国内的 TBM 性能预测模型, 如用点荷载试验测定岩石点荷载强度 I_s , 用声波试验测定岩体完整性系数 K_v , 用地质罗盘测定不连续面和隧道轴向之间的夹角 α , 用 Cerchar 磨蚀性试验测定岩石的磨蚀性, 用 X 射线衍射测定岩样石英含量。测定岩样石英含量时, 同时记录岩样的岩石类型、颜色、颗粒大小、胶结方式和其他矿物含量等内容。

(4) 目前用于表征岩石脆性的指标约有 30 种, 专门用于评价岩石脆性对 TBM 施工性能影响的脆性指标有挪威科技大学^[3]开发的 S_{20} 和 S.Yagiz^[43]基于冲击贯入试验开发的峰值斜率指数 PSI 。Q. M. Gong 和 J. Zhao^[77]采用岩石脆性指数 B_5 (岩石单轴抗压强度与抗拉强度之比)来表征岩石脆性对 TBM 施工性能的影响。总的来说, 岩石脆性指标的选取还需进一步研究。

(5) 目前用于预测施工速度和刀具磨损的模型

较少，需加强这方面的研究，因为施工速度决定了 TBM 隧道的开挖工期，而刀具费用约占掘进施工费用的 $1/3$ ^[79]。基于 TBM 施工速度和刀具磨损对岩体可掘性进行分级，用于指导 TBM 隧道施工。

(6) 注意权衡 TBM 性能预测模型中输入参数的易得性、模型的复杂性和预测结果的准确性三者之间的关系。选用对 TBM 施工性能起决定性的影响因素，并采用简易试验获取这些指标。

(7) 开发多个 TBM 性能预测模型，对其预测结果进行对比，综合考量后选取最优预测结果以保证预测准确性。

6 结 论

(1) 目前国内在 TBM 性能预测模型研究方面进展缓慢，仅有一个用于预测泥岩和砂岩地层条件下盾构性能的简单经验预测模型，而国外自 20 世纪 70 年代以来已经开发了多达 30 几种 TBM 性能预测模型。

(2) 对国外理论模型和复杂经验模型(总计 17 个)中的输入参数进行统计分析，发现影响 TBM 性能的岩体参数主要包括不连续面间距、岩石单轴抗压强度、不连续面和隧道轴向间的夹角、隧道直径和岩石脆性等。

(3) 影响 TBM 性能的设备参数主要包括单刀推力、刀盘转速、刀具直径、刀间距、刀尖宽度和滚刀岩石接触角等。

(4) 从国外 TBM 性能预测模型的发展历程来看，国内需要结合自身实际，选取国内普遍使用的、对 TBM 性能起决定性作用的参数，联合业主、设计院、施工方和科研人员，收集大量的 TBM 施工性能数据和相应地质资料，权衡 TBM 性能预测模型中输入参数的易得性、模型的复杂性和预测结果的准确性三者之间的关系，开发适用于国内的 TBM 性能预测模型。

参考文献(References)：

[1] 钱七虎,李朝甫. 隧道掘进机在中国地下工程中应用现状及前景展望[J]. 地下空间,2002,22(1):1-11.(QIAN Qihu, LI Chaopu. The present and prospect of application of tunneler in China's underground engineering[J]. Underground Space,2002,22(1):1-11.(in Chinese))

[2] 王梦恕,李典璜,张镜剑,等. 岩石隧道掘进机(TBM)施工及工程实例[M]. 北京:中国铁道出版社,2004:16-23.(WANG Mengshu, LI Dianhuang, ZHANG Jingjian, et al. The hard rock tunnel boring

machine and tunnels excavated by TBM[M]. Beijing: China Railway Press, 2004: 16-23.(in Chinese))

[3] BRULAND A. Hard rock tunnel boring[Ph. D. Thesis][D]. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology, 1998.

[4] 龚秋明. 掘进机隧道掘进概论[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 41.(GONG Qiuming. Introduction to tunnel boring machine[M]. Beijing: Science Press, 2014: 41.(in Chinese))

[5] 张镜剑,傅冰骏. 隧道掘进机在我国应用的进展[J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(2):226-238.(ZHANG Jingjian, FU Bingjun. Advances in tunnel boring machine application in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(2): 226-238.(in Chinese))

[6] ROBBINS R J. Present trends and future directions in tunnelling[C]// The Yugoslav Symp. on Rock Mechanics and Underground Actions. [S. l.]: [s. n.], 1980: 11.

[7] NELSON P P. TBM performance analysis with reference to rock properties[J]. Comprehensive Rock Engineering, 1993, 4(10): 261-291.

[8] 谷志孟,吕福庆. 使用掘进机条件下岩石可钻性的试验研究[J]. 岩土力学,1983,4(1):47-58.(GU Zhimeng, LU Fuqing. The excavatability of rock under use of excavators[J]. Rock and Soil Mechanics, 1983, 4(1): 47-58.(in Chinese))

[9] 王石春. 隧道掘进机与地质因素关系综述[J]. 世界隧道,1998,(2):39-43.(WANG Shichun. Relationship between TBM Tunneling and geological conditions[J]. World Tunnel, 1998, (2): 39-43.(in Chinese))

[10] 何发亮,谷明成. TBM 施工隧道围岩分级方法研究[J]. 岩石力学与工程学报,2002,21(9):1350-1354.(HE Faliang, GU Mingcheng. Study on surrounding rock classification of tunnel cut by TBMs[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(9): 1350-1354.(in Chinese))

[11] 刘明月,杜彦良,麻士琦. 地质因素对 TBM 掘进效率的影响[J]. 石家庄铁道学院学报,2002,15(4):40-43.(LIU Mingyue, DU Yanliang, MA Shiqi. Analysis of relationship between geologic condition and the efficiency of TBM boring[J]. Journal of Shijiazhuang Railway Institute, 2002, 15(4): 40-43.(in Chinese))

[12] 李春明,彭耀荣. TBM 施工隧洞围岩分类方法的探讨[J]. 中外公路,2006,26(3):235-237.(LI Chunming, PENG Yaorong. Discussion about surrounding rock classification of tunnel excavate by TBMs[J]. Journal of China and Foreign Highway, 2006, 26(3): 235-237.(in Chinese))

[13] 王学潮. 南水北调西线工程 TBM 施工围岩分级研究[M]. 郑州:黄河水利出版社,2011:3-25.(WANG Xuechao. Study on surrounding rock classification of tunnel excavate by TBMs of the west route of

- South to North water transfer project[M]. Zhengzhou : Yellow River Water Conservancy Press , 2011 : 3 – 25.(in Chinese)
- [14] 宋克志, 孙 谋. 复杂岩石地层盾构掘进效能影响因素分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(10) : 2 092 – 2 096.(SONG Kezhi , SUN Mou. Analysis of influencing factors of shield tunneling performance in complex rock strata[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 2007 , 26(10) : 2 092 – 2 096.(in Chinese))
- [15] 宋克志, 孙树贤, 袁大军, 等. 基于盾构掘进参数的岩石可切削性模糊识别[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(增 1) : 3 196 – 3 202.(SONG Kezhi , SUN Shuxian , YUAN Dajun , et al. Fuzzy recognition for rock cuttability based on shield driving parameters[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 2008 , 27(Supp.1) : 3 196 – 3 202.(in Chinese))
- [16] 温 森, 赵延喜, 杨圣奇. 基于 Monte Carlo-BP 神经网络 TBM 掘进速度预测[J]. 岩土力学, 2009, 30(10) : 3 127 – 3 132.(WEN Sen , ZHAO Yanxi , YANG Shengqi. Prediction on penetration rate of TBM based on Monte Carlo-BP neural network[J]. Rock and Soil Mechanics , 2009 , 30(10) : 3 127 – 3 132.(in Chinese))
- [17] 龚秋明, 余祺锐, 王继敏, 等. 不同层厚层状岩体对 TBM 开挖的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(7) : 1 442 – 1 449.(GONG Qiuming , SHE Qirui , WANG Jimin , et al. Influence of different thicknesses of marble layers on TBM excavation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 2010 , 29(7) : 1 442 – 1 449.(in Chinese))
- [18] 龚秋明, 余祺锐, 侯哲生, 等. 高地应力作用下大理岩岩体的 TBM 掘进试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(12) : 2 522 – 2 532.(GONG Qiuming , SHE Qirui , HOU Zhesheng , et al. Experimental study of TBM penetration in marble rock mass under high geostress[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 2010 , 29(12) : 2 522 – 2 532.(in Chinese))
- [19] 吴世勇, 龚秋明, 王 鸽, 等. 锦屏 II 级水电站深部大理岩板裂化破坏试验研究及其对 TBM 开挖的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(6) : 1 089 – 1 095.(WU Shiyong , GONG Qiuming , WANG Ge , et al. Experimental study of slabbing failure for deepburied marble at Jingping II hydropower station and its influences on TBM excavation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 2010 , 29(6) : 1 089 – 1 095.(in Chinese))
- [20] 苏利军, 孙金山, 卢文波. 基于颗粒流模型的 TBM 滚刀破岩过程数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(9) : 2 823 – 2 829.(SU Lijun , SUN Jinshan , LU Wenbo. Research on numerical simulation of rock fragmentation by TBM cutters using particle flow method[J]. Rock and Soil Mechanics , 2009 , 30(9) : 2 823 – 2 829.(in Chinese))
- [21] 孙金山, 陈 明, 陈保国, 等. TBM 滚刀破岩过程影响因素数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(6) : 1 891 – 1 897.(SUN Jinshan , CHEN Ming , CHEN Baoguo , et al. Numerical simulation of influence factors for rock fragmentation by TBM cutters[J]. Rock and Soil Mechanics , 2011 , 32(6) : 1 891 – 1 897.(in Chinese))
- [22] 莫振泽, 李海波, 周青春, 等. 基于 UDEC 的隧道掘进机滚刀破岩数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(4) : 1 196 – 1 202.(MO Zhenze , LI Haibo , ZHOU Qingchun , et al. Research on numerical simulation of rock breaking using TBM disc cutters based on UDEC method[J]. Rock and Soil Mechanics , 2012 , 33(4) : 1 196 – 1 202.(in Chinese))
- [23] 张 魁, 夏毅敏, 谭 青, 等. 不同围压条件下 TBM 刀具破岩模式的数值研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(11) : 1 780 – 1 787.(ZHANG Kui , XI Yiming , TAN Qing , et al. Numerical study on modes of breaking rock by TBM cutter under different confining pressures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering , 2010 , 32(11) : 1 780 – 1 787.(in Chinese))
- [24] 谭 青, 李建芳, 夏毅敏, 等. 盘形滚刀破岩过程的数值研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(9) : 2 707 – 2 714.(TAN Qing , LI Jianfang , XI Yiming , et al. Numerical research on rock fragmentation process by disc cutter[J]. Rock and Soil Mechanics , 2013 , 34(9) : 2 707 – 2 714.(in Chinese))
- [25] 谭 青, 朱 逸, 夏毅敏, 等. 节理特征对 TBM 盘形滚刀破岩特性的影响[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2013, 44(10) : 4 040 – 4 046.(TAN Qing , ZHU Yi , XI Yimin , et al. Influence of joint characteristics on rock fragmentation induced by TBM disc cutter[J]. Journal of Central South University : Science and Technology , 2013 , 44(10) : 4 040 – 4 046.(in Chinese))
- [26] 马洪素, 纪洪广. 节理倾向对 TBM 滚刀破岩模式及掘进速率影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(1) : 155 – 163.(MA Hongsu , JI Hongguang. Experimental study of the effect of joint orientation on fragmentation modes and penetration rate under TBM disc cutters[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 2011 , 30(1) : 155 – 163.(in Chinese))
- [27] 邹 飞, 李海波, 周青春, 等. 岩石节理倾角和间距对隧道掘进机破岩特性影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(6) : 1 640 – 1 646.(ZOU Fei , LI Haibo , ZHOU Qingchun , et al. Experimental study of influence of joint space and joint angle on rock fragmentation by TBM disc cutter[J]. Rock and Soil Mechanics , 2012 , 33(6) : 1 640 – 1 646.(in Chinese))
- [28] 祁生文, 伍法权, 王大国, 等. 岩石隧道掘进机(TBM)的施工速度(AR)与围岩分类[C]// 隧道、地下工程及岩石破碎学术研讨会论文集, 2007 : 67 – 76.(QI Shengwen , WU Faquan , WANG Daguo , et al. Advance rate of rock tunnel boring machine and surrounding rock classification[C]// Symposium on Tunneling , Underground Engineering and Rock Fragmentation. [S. l.] : [s. n.] , 2007 : 67 – 76.(in Chinese))
- [29] 王 旭, 李 晓, 苏鹏程. 预测 TBM 掘进速率的难点及对策研究[J]. 现代隧道技术, 2009, 46(4) : 71 – 76.(WANG Xu , LI Xiao , SU

- Pengcheng. Difficulties for predicting TBM advance rate and countermeasures[J]. *Modern Tunneling Technology*, 2009, 46(4) : 71 – 76.(in Chinese)
- [30] 王旭, 李晓, 李守定. 关于用岩体分类预测 TBM 掘进速率 AR 的讨论[J]. *工程地质学报*, 2008, 16(4) : 470 – 475.(WANG Xu, LI Xiao, LI Souding. Problems in the prediction of the TBM advance rate with rock mass classification and their possible solutions[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2008, 16(4) : 470 – 475.(in Chinese))
- [31] 王旭, 李晓, 廖秋林. 岩石可掘进性研究的试验方法述评[J]. *地下空间与工程学报*, 2009, 5(1) : 67 – 73.(WANG Xu, LI Xiao, LIAO Qiulin. A review of rock boreability testing for TBM tunnelling[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2009, 5(1) : 67 – 73.(in Chinese))
- [32] ROSTAMI J. Development of a force estimation model for rock fragmentation with disc cutters through theoretical modeling and physical measurement of crushed zone pressure[Ph. D. Thesis][D]. Golden : Colorado School of Mines, 1997.
- [33] ROSTAMI J, OZDEMIR L. A new model for performance prediction of hard rock TBMs[C]// *Proceedings of the Rapid Excavation and Tunneling Conference*. [S. l.] : [s. n.], 1993 : 793 – 809.
- [34] BARTON N R. TBM tunnelling in jointed and faulted rock[M]. Boca Raton : CRC Press, 2000 : 170 – 175.
- [35] BIENIAWSKI Z T, CELADA B, GALERA J M. TBM Excavability : prediction and machine-rock interaction[C]// *Proceedings of RETC*, Toronto : [s. n.], 2007 : 1 118 – 1 130.
- [36] BIENIAWSKI Z T, CELADA B, GALERA J M. Predicting TBM excavability[J]. *Tunnels and Tunnelling International*, 2007(9) : 25 – 28.
- [37] BIENIAWSKI Z T, GRANDORI R. Predicting TBM Excavability-Part II[J]. *Tunnels and Tunnelling International*, 2007(11) : 15 – 18.
- [38] BIENIAWSKI Z T, CELADA B, GALERA J M, et al. New applications of the excavability index for selection of TBM types and predicting their performance[C]// *ITA-AITES World Tunnel Congress and 34th ITA General Assembly*. Agra : [s. n.], 2008 : 1 618 – 1 629.
- [39] SANIO H P. Prediction of the performance of disc cutters in anisotropic rock[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 1985, 22(3) : 153 – 161.
- [40] BOYD R J. Hard rock continuous mining machine : Mobile Miner MM – 120[C]// *Rock Excavation Engineering Seminar*. Queensland : University of Queensland, 1986 : 618 – 626.
- [41] OZDEMIR L. Development of theoretical equations for predicting tunnel borability[Ph. D. Thesis][D]. Golden : Colorado School of Mines, 1977.
- [42] ROSTAMI J. Design optimization, performance prediction, and the economic analysis of TBM application for the construction of proposed Yucca Mountain nuclear waste repository[Ph. D. Thesis][D]. Golden : Colorado School of Mines, 1991.
- [43] YAGIZ S. Development of rock fracture and brittleness indices to quantify the effects of rock mass features and toughness in the CSM model basic penetration for hard rock tunneling machines[Ph. D. Thesis][D]. Golden : Colorado School of Mines, 2002.
- [44] RAMEZANZADEH A. Performance analysis and development of new models for performance prediction of hard rock TBMs in rock mass[Ph. D. Thesis][D]. Lyon : Institut National des Sciences Appliquées, 2005.
- [45] TARKOY P J. Predicting TBM penetration rates in selected rock types[C]// *Proceedings of the Ninth Canadian Rock Mechanics Symposium*. Montreal : [s. n.], 1973.
- [46] GRAHAM P C. Rock exploration for machine manufacturers[J]. *Exploration for Rock Engineering*, 1976 : 173 – 180.
- [47] FARMER I W, GLOSSOP N H. Mechanics of disc cutter penetration[J]. *Tunnels and Tunnelling*, 1980, 12(6) : 22 – 25.
- [48] CASSINELLI F, CINA S, INNOURATO N. Power consumption and metal wear in tunnel-boring machines : analysis of tunnel-boring operation in hard rock[C]// *Proceedings of the 3rd International Symposium*. Brighton : [s. n.], 1982 : 73 – 81.
- [49] SNOWDON R A, RYLEY M D, TEMPORAL J. A study of disc cutting in selected British rocks[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 1982, 19(3) : 107 – 121.
- [50] NELSON P, O'ROURKE T D, KULHAWY F H. Factors affecting TBM penetration rates in sedimentary rocks[C]// *Proceedings of 24th US Symposium on Rock Mechanics*. [S. l.] : [s. n.], 1983 : 227 – 237.
- [51] BAMFORD W E. Rock test indices are being successfully correlated with tunnel boring machine performance[C]// *the Fifth Australian Tunnelling Conference : State of the Art in Underground Development and Construction*. [S. l.] : Institution of Engineers, Australia, 1984 : 9 – 22.
- [52] BÜCHI E. Einfluss geologischer parameter auf die vortriebsleistung einer tunnelbohrmaschine[Ph. D. Thesis][D]. [S. l.] : Diss. Universität Bern, 1984.
- [53] HUGHES H M. The relative cuttability of coal-measures stone[J]. *Mining Science and Technology*, 1986, 3(2) : 95 – 109.
- [54] INNOURATO N, MANCINI A, RONDENA E, et al. Forecasting and effective TBM performances in a rapid excavation of a tunnel in Italy[C]// *The 7th ISRM Congress*. International Society for Rock Mechanics, 1991 : 1 009 – 1 014.
- [55] SUNDIN N O, WÄNSTEDT S. A boreability model for TBMs[C]// *Proceedings of the 1st North American Rock Mechanics Symposium*.

- Rotterdam : A. A. Balkema , 1994 : 311 – 318.
- [56] O'ROURKE J E , SPRING J E , COUDRAY S V. Geotechnical parameters and tunnel boring machine performance at Goodwill Tunnel , California[C]// Proceedings of the 1st North American Rock Mechanics Symposium. Rotterdam : A.A.Balkema , 1994 : 467 – 473.
- [57] NELSON P P , AL-JALIL Y A , LAUGHTON C. Tunnel boring machine project data bases and construction simulation[R]. Austin , Texas : The University of Texas at Austin , 1994 , 708 – 712.
- [58] 龚秋明, 赵 坚, 张喜虎. 岩石隧道掘进机的施工预测模型[J]. 岩石力学与工程学报 ,2004 ,23(增 2) :4 709 – 4 714.(GONG Qiuming , ZHAO Jian ,ZHANG Xihu. Performance prediction of hard rock TBM tunneling[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 2004 , 23(Supp.2) : 4 709 – 4 714.(in Chinese))
- [59] YAGIZ S , ROSTAMI J , OZDEMIR L. Recommended rock testing methods for predicting TBM performance : focus on the CSM and NTNU Models[C]// Proceedings of the ISRM International Symposium. [S. l.] : [s. n.] , 2008 : 1 523 – 1 530.
- [60] SAPIGNI M , BERTI M , BETHAZ E , et al. TBM performance estimation using rock mass classifications[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences , 2002 , 39(6) : 771 – 788.
- [61] BLINDHEIM O T. A critique of QTBM[J]. Tunnels and Tunnelling International , 2005 , 37(6) : 32 – 35.
- [62] PALMSTROM A , BROCH E. Use and misuse of rock mass classification systems with particular reference to the Q-system[J]. Tunnelling and Underground Space Technology , 2006 , 21(6) : 575 – 593.
- [63] ALBER M. Advance rates of hard rock TBMs and their effects on project economics[J]. Tunnelling and Underground Space Technology , 2000 , 15(1) : 55 – 64.
- [64] ALBER M. Design of high speed TBM-drives[C]// Proceedings of 8th Int. IAEG Congr. Rotterdam : [s. n.] , 1998 : 3 537 – 3 543.
- [65] ALVAREZ G M , BRUINES PA , VERHOEF P N W. Modeling tunnel boring machine performance by neuro-fuzzy methods[J]. Tunnelling and Underground Space Technology , 2000 , 15(3) : 259 – 269.
- [66] TAKAGI T , SUGENO M. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control[J]. Systems , Man and Cybernetics , IEEE Transactions on , 1985 , (1) : 116 – 132.
- [67] FARROKH E , ROSTAMI J , LAUGHTON C. Study of various models for estimation of penetration rate of hard rock TBMs[J]. Tunnelling and Underground Space Technology , 2012 , 30(1) : 110 – 123.
- [68] RIBACCHI R , FAZIO A L. Influence of rock mass parameters on the performance of a TBM in a gneissic formation(Varzo Tunnel)[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering , 2005 , 38(2) : 105 – 127.
- [69] YAGIZ S. Utilizing rock mass properties for predicting TBM performance in hard rock condition[J]. Tunnelling and Underground Space Technology , 2008 , 23(3) : 326 – 339.
- [70] GONG Q M , ZHAO J. Development of a rock mass characteristics model for TBM penetration rate prediction[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences , 2009 , 46(1) : 8 – 18.
- [71] HASSANPOUR J , ROSTAMI J , KHAMEHCHIYAN M , et al. Developing new equations for TBM performance prediction in carbonate-argillaceous rocks : a case history of Nowsood water conveyance tunnel[J]. Geomechanics and Geoengineering : An International Journal , 2009 , 4(4) : 287 – 297.
- [72] HASSANPOUR J , ROSTAMI J , KHAMEHCHIYAN M , et al. TBM performance analysis in pyroclastic rocks : a case history of Karaj water conveyance tunnel[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering , 2010 , 43(4) : 427 – 445.
- [73] HASSANPOUR J , ROSTAMI J , ZHAO J. A new hard rock TBM performance prediction model for project planning[J]. Tunnelling and Underground Space Technology , 2011 , 26(5) : 595 – 603.
- [74] KHADEMI H J , SHAHRIAR K , REZAI B , et al. Performance prediction of hard rock TBM using rock mass rating(RMR) system[J]. Tunnelling and Underground Space Technology , 2010 , 25(4) : 333 – 345.
- [75] DELISIO A , ZHAO J , EINSTEIN H H. Analysis and prediction of TBM performance in blocky rock conditions at the Löttschberg base tunnel[J]. Tunnelling and Underground Space Technology , 2013 , 33(1) : 131 – 142.
- [76] DELISIO A , ZHAO J. A new model for TBM performance prediction in blocky rock conditions[J]. Tunnelling and Underground Space Technology , 2014 , 43(1) : 440 – 452.
- [77] GONG Q M , ZHAO J. Influence of rock brittleness on TBM penetration rate in Singapore granite[J]. Tunnelling and Underground Space Technology , 2007 , 22(3) : 317 – 324.
- [78] 尚彦军, 杨志法, 曾庆利, 等. TBM 施工遇险工程地质问题分析和失误的反思[J]. 岩石力学与工程学报 , 2007 , 26(12) : 2 404 – 2 411. (SHANG Yanjun , YANG Zhifa , ZENG Qingli , et al. Retrospective analysis of TBM accidents from its poor flexibility to complicated geological conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 2007 , 26(12) : 2 404 – 2 411.(in Chinese))
- [79] 万治昌, 沙明元, 周雁领. 盘形滚刀的使用与研究(1) : TB880E 型掘进机的秦岭隧道施工中的应用[J]. 现代隧道技术 , 2002 , 39(5) : 1 – 11.(WAN Zhichang , SHA Mingyuan , ZHOU Yanling. Study on disk cutters for hard rocks—Application of TB880E TBM in Qinling Tunnel[J]. Modern Tunnelling Technology , 2002 , 39(5) : 1 – 11.(in Chinese))